

博士論文

自由曲面薄板成形品の板厚測定に関する研究

金沢大学大学院自然科学研究科

システム創成科学専攻

知的システム開発講座

学 籍 番 号 1323122002

氏 名 奥川 裕理恵

主任指導教員名 浅川 直紀

提出年月 平成 28 年 1 月

目次

第1章 緒論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	4
1.3 本論文の構成	6
第2章 システム構成.....	8
2.1 概要	8
2.2 測定ユニット	10
2.3 板厚測定原理	10
2.4 測定結果描画	11
第3章 測定経路生成の基本手法.....	13
3.1 概要	13
3.2 形状測定経路	14
3.3 板厚測定経路	15
3.4 ロボット動作プログラムの生成.....	15
第4章 測定精度の推定.....	19
4.1 概要	19
4.2 ロボット動作精度.....	21
4.3 センサ特性	24
4.4 誤差推定	26
4.5 測定実験	29
4.5.1 平板	29
4.5.2 半円筒面	31
4.6 まとめ	35
第5章 高傾斜面を持つ形状の測定.....	36
5.1 概要	36
5.2 測定方法	37
5.3 測定実験	40
5.4 まとめ	43
第6章 干渉を考慮した測定経路生成.....	44
6.1 概要	44
6.2 干渉検出	45
6.2.1 干渉検出対象のモデル化.....	45
6.2.2 干渉検出方法.....	46
6.3 C-Space を用いた測定可能領域の表現.....	46

6.3.1	コンフィギュレーション空間.....	46
6.3.2	正反射領域.....	49
6.3.3	受光量不足領域.....	49
6.3.4	干渉領域	50
6.4	連続性を考慮した干渉回避経路生成.....	50
6.4.1	測定姿勢の連続性.....	50
6.4.2	測定経路生成手順.....	50
6.4.3	クォータニオン.....	51
6.4.4	球面三次補間 (squad)	53
6.4.5	代表点の選定.....	55
6.4.6	初期姿勢の決定.....	57
6.4.7	補間後の測定姿勢検証.....	58
6.4.8	板厚相当値の算出.....	58
6.5	測定実験	59
6.5.1	実験条件	59
6.5.2	板厚測定結果.....	61
6.5.3	測定経路	62
第7章	表面テクスチャを持つ工作物のための経路生成.....	70
7.1	概要	70
7.2	測定方法	70
7.3	測定実験	71
7.3.1	工作物全体.....	71
7.3.2	平面部	74
第8章	結論	78
8.1	結論	78
8.2	今後の展望	79
謝辞	81

第 1 章 緒論

1.1 研究背景

薄板加工の量産化を支えているプレス加工はこれまでに、高精度、高速化を実現するため大きな進歩を遂げてきた。プレス機械の始まりは 1795 年英国の John Bramah が作った水圧機を鍛造に用いたことだといわれている[1]。その後、日本で金型を用いたプレスが行われるようになったのは、明治 4 年（1871 年）に開始された金・銀貨幣をもってとされており[2]、明治後期には大型プレスが輸入されるようになった。戦時中は、軍需品関連の増大につれて発展を遂げ、戦後の高度成長期には、自動車・家電などの量産型機械産業の発展や、新成形材料の開発、新しい成形加工技術の進歩によって日本のプレス産業は本格的な発展を遂げた[2]。中でも自動車産業は、プレス加工の申し子とも呼ばれるほどプレス加工の適応度の高く、自動車産業の発展と共に金型産業の基礎が作られたといえる[2]。その後、2 度にわたる石油危機や排ガス騒音規制など自動車産業を取り巻く環境は大きく変化していき、このような変化に応じた排ガス規制や低燃費車開発のために、自動車産業は車体構造改良や機能性鋼板を使用した自動車の軽量化を図ることとなった[3]。

プレス部品の軽量化を実現するためには、高強度鋼板やアルミニウム合金板などの軽量化材料が使用され、その使用量は年々増大している（図 1.1[4]）。近年ではさらに大きな軽量化が期待できる CFRP（炭素繊維強化プラスチック）の適用も始まっており、今後は本格的な採用が期待されている[5]。また実用的なプレス材料選択のためには、軽量化効果だけでなく材料・加工コストや強度特性などの観点も必要となる。これらは開発プロセスの各段階において CAD/CAE/CAM などのコンピュータ支援技術を用いたシミュレーションにより、実験や試作を減らして、あるいは行わずに検討することができる。また製品の加工精度を保証する金型開発についても成形シミュレーションが用いられる。金型開発プロセスにおける成形シミュレーションの適用を図 1.2[6]に示すが、各段階において成形性の問題点を事前に予測することが可能であり、複数の設計案検討、試作のコスト削減に役立てられている。

一方、大量生産において総寿命が数百万ショットとされる金型は使用回数の増大につれて徐々に摩耗・劣化していくため、定期的な保守整備による精度管理が必要である。図 1.3[7]に金型の一般的な寿命を示すが、成形精度が低下する度に再研磨等による機能回復が行われる。一般のプレスの場合、最低でも精度が 1 級落ちたら修正するようしておくことで管理が容易になるといわれている[8]。このような精度管理のために現在の加工状態を把握するためには、金型や実製品の精度検査が必要となり、実製品については、形状・寸法精度や変形量、厚みについての検査が必要となる。各検査項目の測定方法としては、形状・寸法測定には三次元形状測定機が用いられ、設計値との比較が行われる。変形量の観察のためにはスクライブドサークルテストと呼ばれる加工前後のマーク変形量により歪みの大きさが測定される。また、板厚変化は一般的にはポイントマイクロメータや超音波厚さ計

を用いた手作業での測定が行われている[9][10]. これらの検査についても様々な自動化への取り組みが行われているが、板厚変化は形状や歪み計測と比較して自動化が進んでいない検査項目といえる. その理由としては精度や測定方法の複雑さなどの問題点が挙げられるが、現状の測定方法であるポイントマイクロメータや超音波厚さ計についても、手作業での測定のため作業者の熟練度に影響される、測定時間が長いという問題があるため、熟練した作業者が成形性が悪化しやすいと推定される特定の箇所のみを選択的に計測しているのが現状である. そのため、シミュレーション結果と実製品との比較が困難となり、シミュレーションの有効活用の妨げとなっている. またポイントマイクロメータは非破壊での測定が難しく、必要箇所を切断する必要があるため材料の損失が発生する. 実用的な板厚検査の自動化を実現するためには以下の項目を満たしていることが望まれる.

- (1) 測定精度
- (2) 測定時間
- (3) 測定形状の汎用性
- (4) 非破壊測定が可能
- (5) 操作の容易性
- (6) 導入の容易性

板厚は製品強度を決定するための重要な要素であり、自動化によるコスト削減や作業者の技量に依存しない検査を実現するためにも、上記の項目を満たす実用的な板厚測定の自動化が望まれている.

板厚測定の自動化について、平板に対する板厚測定システムは鋼板の圧延工程を主体として多数実用化されている. 使用されている測定方式としては、放射線方式、超音波方式、光応用距離測定方式が挙げられる[11]. この中で鋼板の厚み計測として最も使用されているのが放射線方式であり、 γ 線或いはX線方式が使用されている. その理由としては、放射線の鋼板中の透過減衰量から板厚を計測するため、鋼板のパスライン変動、センサの位置変動等の外乱要因の影響を受けにくく、高精度な板厚計測が可能であるという利点が挙げられる[12]. しかし γ 線方式では照射ビーム径が大きく、検出器の応答性が低いことから、鋼板先端部等に関して板厚計測精度が劣化するという問題点がある. そこで近年では、高い応答性を持ち、小スポットでの測定が可能なレーザ変位計を使用した板厚計測が実用され始めている[13]. レーザ変位計を使用した板厚計測では、対向させて設置した一対のレーザ距離計で測定対象とする板を挟み込み、センサ・板間の距離を測定し、センサ間の設置距離は既知としてその差分から板厚を算出する.

一方、プレス製品のように自由形状を有する薄板加工品の板厚計測については、光学式あるいは接触式三次元測定機や工業用X線CTを用いた方法が報告されている. 三次元測定機を用いた方法では、円筒形状などの単純形状であれば接触式のプローブを用いて円筒

の内径，外径部分を計測してその差分から板厚を算出することが可能であるが，一般形状に対しては厚み方向を決定する製品表裏の対応点を算出することが困難なため適用が難しい．また製品全体を計測するためには多大な時間を要する．そのため，光学式プローブを用いて表面形状を製品表裏から別々にデータ取得後，それらのデータを合成することで厚みのある製品形状データを取得し，そのデータを使用して板厚が算出する方法が三次元測定機を用いた方法では一般的である[14]．しかし測定データには測定誤差も含まれることから，正確なデータ合成のためには複雑な処理を必要とし，作業者が修正を加えるなどその負担は大きい．

透過計測である X 線 CT の産業用の利用としては，内部構造や欠損の確認への使用から始まり，最近では解像度の向上が図られ，寸法形状や板厚計測に用いられ始めている．測定したデータはボクセルと呼ばれるボリュームデータで表現されるが，形状および板厚を評価するためにはメッシュデータへの変換が必要となる．また板厚計測については透過計測であるため両面を同時に測定可能であり，三次元測定機のようなデータ合成は必要としない．しかし線質硬化によりデータ欠損が発生する問題を低減するために，製品の取り付け向きに工夫が必要である[15]，ノイズの発生，適切な撮像条件に試行錯誤を必要とする[16]など寸法形状を高精度に計測するためには不確定要素が多いといえる．

そこで，本研究では，作業者によるデータ処理操作を必要とせず，プレス製品等の自由形状を有する薄板加工品の板厚測定の自動化を実現する板厚測定システムの開発を目的とする．

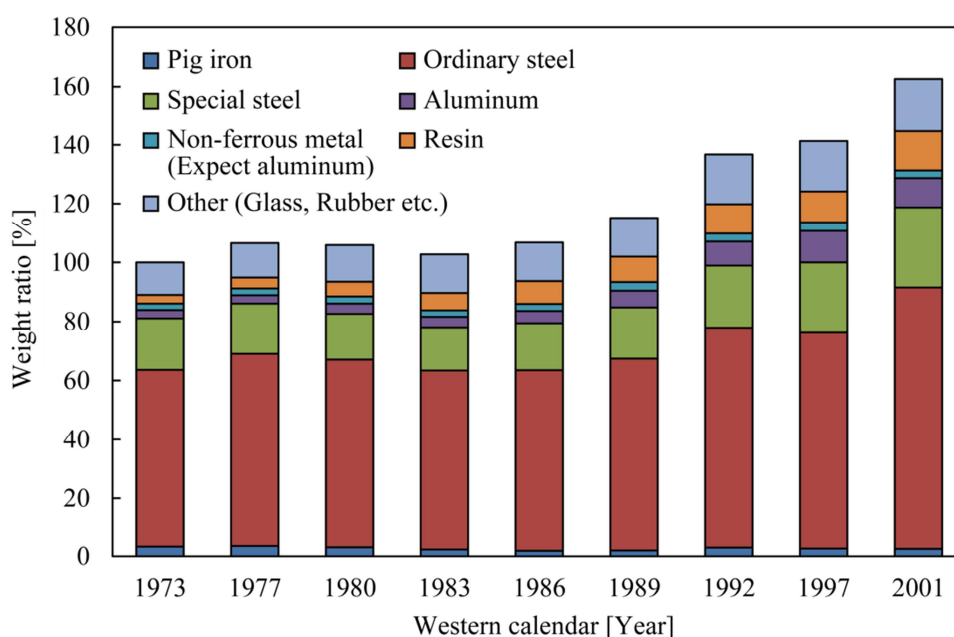


Fig. 1.1 Transition of raw material composition ratio in normal and small passenger cars [4]

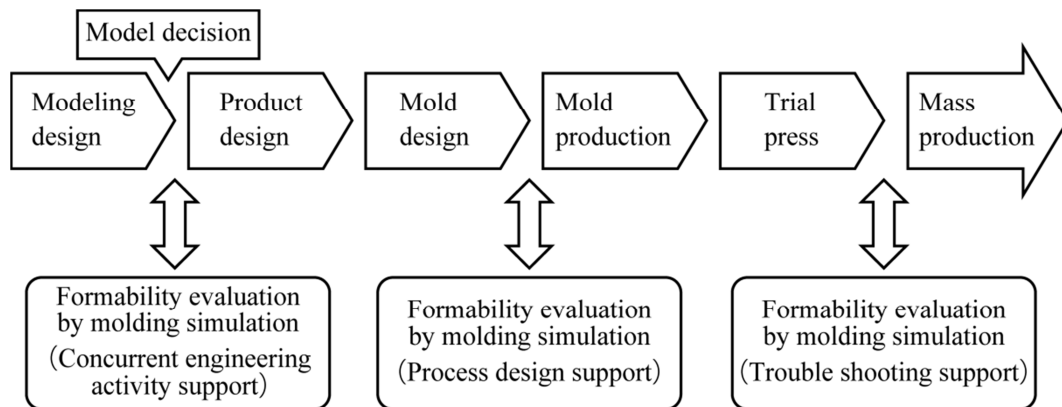


Fig. 1.2 Application of forming simulation in the development process [6]

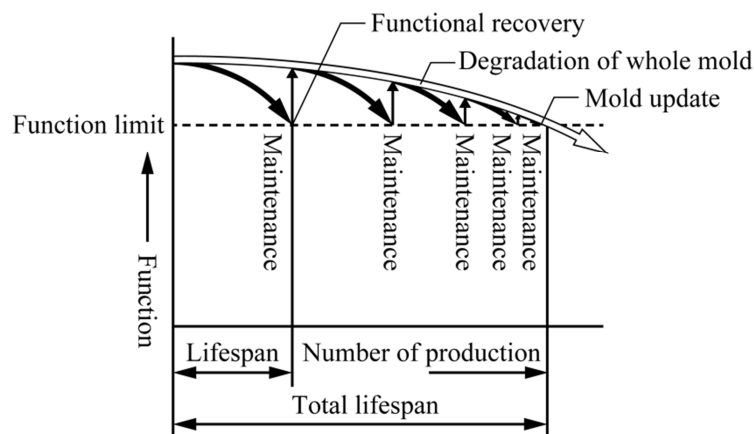


Fig. 1.3 Service life of general mold [7]

1.2 研究目的

製品の設計値との比較や作業者の技量に依存しない板厚管理のためには、板厚を面データとして管理し、視覚的評価が可能であることが望まれるが、接触式の測定では、膨大な測定点群を現実的な測定時間で取得することは困難であるため、高密度な多点群データを短時間に取得可能な非接触式での測定が必要である。

本研究では、複雑形状に対応するために、測定範囲が広く、測定方向の変動による影響が小さい拡散反射型三角測量方式のレーザ変位計を測定器として用いる。表裏の測定データ合成を必要としない板厚測定を実現するためには、2台のレーザ変位計を対向に設置して測定対象物を挟み込み、設置間距離と測定値から板厚を測定する。この手法は、平板に対する有用性は示されているが、傾斜面を持つ曲面に適用するためには、測定物形状に応じ

てレーザ照射方向を決定する必要がある。

本研究では、測定面に対して適切な方向へのレーザ照射を実現するために、6軸産業用ロボットを測定対象物の位置決め装置として使用し、レーザ変位計に対する測定対象物の位置決めを行う。

また、測定物形状については、実製品にはCADデータとの形状誤差が含まれている可能性があるため、実形状データを使用する。よって、本システムでは板厚測定を行う前段階として形状測定を実施し、取得した形状データを基に板厚測定を行うこととし、基本となる形状・板厚測定方法に対する測定精度を検証することで、開発するシステムの基本的な性能を評価する。

形状測定データから板厚方向を算出する場合、形状測定の密度・精度の低下は、板厚測定精度にも影響を与える。さらに、複雑形状を評価するためには、全体の高密度な測定データを取得する必要があるため、本研究では、高密度・高精度な形状測定方法を確立することを目的とする。

また、板厚測定では、板厚方向とレーザ照射方向を一致させることで、板厚の直接測定が可能であるが、複雑形状に対する三角測量方式による測定では、測定の死角となる測定物形状とレーザ光との干渉が存在し、測定値の取得が不可能な場合がある。このような干渉が発生する場合には、レーザ照射方向を変更して測定を行うことで、入射角度から板厚を算出することが可能となるが、干渉のみを考慮して測定姿勢を決定するとロボットの動作量が増大し、測定時間が長くなってしまう。そこで本研究では、測定姿勢の連続性を考慮し、干渉を回避する板厚測定姿勢を決定することで、複雑形状に対する干渉・測定時間を考慮した板厚測定方法を確立する。

また、薄板加工品について、製品の表面には付加価値向上等の理由からの付加加工や、加工上の理由から微小な凹凸が形成される場合がある。本研究では、一般的な金属面を測定対象とするが、システム拡張の可能性を検討するために、このような表面テクスチャを持つ測定物に対しての本システムの適用可能性について示す。

以上より、本研究では、複雑形状のための板厚測定の自動化を目的として、以下に示す技術開発及び測定方法を提案する。

- (1) レーザ変位計と産業用ロボットから構成される板厚測定システムの開発
- (2) システムの基本的性能の評価
- (3) 高密度・高精度な形状測定方法
- (4) 測定姿勢の連続性と干渉を考慮した板厚測定方法
- (5) 表面テクスチャを持つ工作物に対する板厚測定方法

1.3 本論文の構成

本論文は第 1 章の緒論から第 8 章の結論までの全 8 章で構成されている．以下に各章の概要を示す．

第 1 章「緒論」では，自由曲面を有する薄板加工品の板厚測定についての現状と課題，本研究の目的について述べる．

第 2 章「システム構成」では，本研究で提案する板厚測定システムの構成と板厚測定原理，測定結果の提示方法について述べる．

第 3 章「測定経路生成の基本手法」では，本システムを用いて実施される形状測定，板厚測定の各測定のための測定経路生成方法について，生成した測定経路のロボット動作プログラムへの変換方法について述べる．

第 4 章「測定精度の推定」では，本システムが持つ誤差要因を検証し，その結果からシステムの測定誤差を推定した結果を述べる．また，基本的な形状に対する測定実験から推定した誤差の検証を行った．

第 5 章「高傾斜面を持つ形状の測定」では，第 3 章で述べた形状測定経路生成方法では測定誤差が増大する高傾斜面に対して，最適な測定経路を再生成して追加形状測定を行う方法について述べる．

第 6 章「干渉を考慮した測定経路生成」では，測定原理に基づいた板厚測定においてレーザと測定物との干渉が生じる測定物のために，測定姿勢を変化させることで干渉を回避した板厚測定経路の生成手法について述べる．また，干渉回避による姿勢の変化量を低減させるために，測定姿勢の連続性についても考慮した結果を述べる．

第 7 章「表面テクスチャを持つ工作物のための経路生成」では，一般的な金属面とは異なる表面性状を持つ測定物に対する本システムの適用可能性を示す．

最後に，第 8 章「結論」では，本論文の結論を述べる．

参考文献

- [1] 特許庁, 技術分野別特許マップ「機械 21 プレス加工」, pp.232, 平成 12 年.
- [2] 浅井敬一郎, 日本における金型産業の特徴, 愛知淑徳大学論集 (ビジネス学部・ビジネス研究科篇), 4, pp.1-13, 2008.
- [3] 村瀬眞澄, プレス技術と金型の進化に関する研究 (自動車産業と冷間工具鋼の発展について), 大阪産業大学経営論集, 12(2), 195-214, 2011-2.
- [4] 日本自動車工業会, 統計資料.
- [5] 木本幸胤, 自動車の安全設計と信頼性向上に貢献する複合材料技術Ⅱ (国内における FRP の自動車応用に関する現状と展望 CFRP 製自動車部品の事例と将来展望), 日本複合材料学会誌, 32(4), pp.147-150, 2006.
- [6] (社) 日本金属プレス工業協会, 基礎から学ぶ実践プレス加工シリーズ プレス成形シミュレーション, 日刊工業新聞社, 2003-5-20 初版.
- [7] 吉田弘美, プレス加工のツボとコツ Q&A, pp.180, 日刊工業新聞社, 2008-9-25.
- [8] アイダ・プレス研究会著 (代表 川崎嶺雄), 知りたいプレス機械, ジャパンマシニスト社, pp.159, 1979-9-10.
- [9] 奈良, 羽深太郎, 山口信幸, プレス部品板厚測定器の機能性評価, 品質光学, 17(2), pp.77-83.
- [10] 村上智広, 基本を理解しスキルアップ! 絵とき プレス現場の観察ノート, pp.4, 日刊工業新聞社, 2010-3-31.
- [11] 市川文彦, 鉄鋼プロセスにおける最近の寸法・形状計測技術, 鉄と鋼, 79(7), pp.48-55, 1993.
- [12] 手塚浩一, 厚板レーザ方式冷間板厚計の開発, 電気学会金属産業研究会, pp.11-13, 2010-12-17.
- [13] 手塚浩一, 厚板せん断ライン用レーザ方式板厚計の開発, JFE 技報, 35, pp.22-27, 2015-02.
- [14] 財団法人長野県テクノ財団, 燃料電池用セパレータの長寿命化, 低コスト化に向けた金型技術, 金属プレス技術, めっき技術の高度化研究開発, 平成 20 年度戦略的基盤技術高度化支援事業成果報告書, 2009-3.
- [15] 高橋勇一, X 線 CT スキャンによるプレス加工品の形状評価技術, 天田財団助成研究成果報告書, 26, pp.126-130, 2013.
- [16] 山本紘司, 水野和康, 島津達哉, 児玉英也, X 線 CT を用いた測定寸法の精度評価, あいち産業科学技術総合センター研究報告 2014, pp.22-25. 2014.

第 2 章 システム構成

2.1 概要

本研究におけるシステム構成を図 2.1 に、使用した機器の仕様を表 2.1, 2.2 に示す。本システムでは、測定物の位置決め装置として 6 軸垂直多関節型ロボット((株)安川電機, HP-6)を使用した。本システムではロボットが測定対象物を把持するため、ロボット先端には図 2.2 に示す測定対象物を把持するためのホルダを取り付ける。このホルダは 2 枚の板をネジで締結することで、測定対象物の平面部分を挟み込むように固定するため、ホルダの平面方向と測定対象物の平面方向が一致する。またホルダの取り付けについては、ホルダの平面方向がロボットハンド座標系{H}の Y_H - Z_H 方向と一致するように取り付ける。ロボットハンド座標系はロボットハンド先端のフランジ面に設定された座標系であり 3.4 にて詳細に示す。

測定器としては三角測量方式のレーザ変位計 ((株) キーエンス, LK-G150) 2 台をコの字型に対向させて設置した測定ユニットを使用する。テーブルに固定された測定ユニットに対して、先端に測定対象物を固定したロボットを動作させることで測定対象物の最適な測定位置・姿勢を実現する。

本システムでは実測定対象物形状に基づいた板厚測定を行うために、形状測定を実施し、取得した形状に応じて板厚測定経路を生成する。よって本システムでは形状、板厚測定の 2 種類の測定が実施される。実形状データを取得することで、CAD データ等が存在しない未知の形状に対する測定が可能となる。各測定のためのロボット動作プログラムは 3 章に示す手順で自動生成される。同一の取り付け状態で形状・板厚測定を行うことで、測定対象物の加工誤差や取り付け誤差に依存しない板厚測定を行うことが可能である。

測定結果は、各測定点が三次元座標値と厚さ情報を持っているため、三次元的な形状データ上にカラーマップなどの板厚分布図をオーバーレイ表示することが可能である。

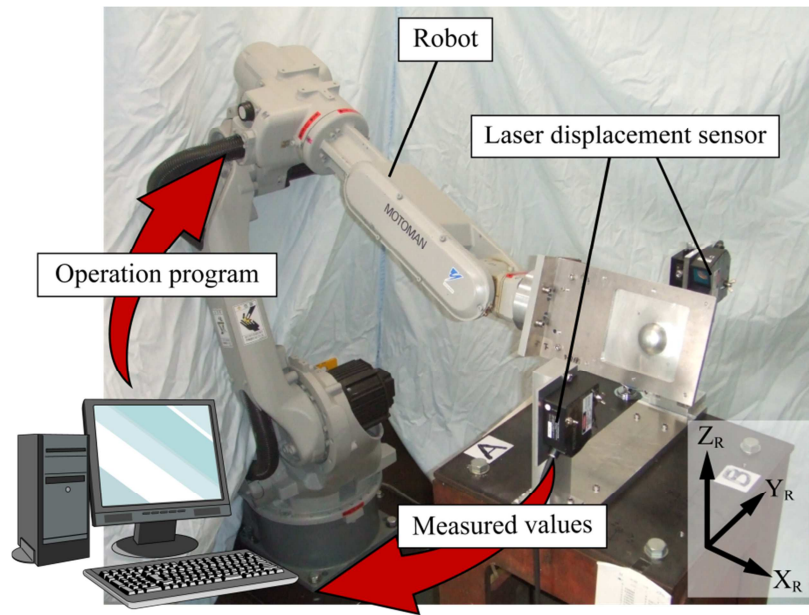


Fig. 2.1 Configuration of the system

Table 2.1 Specification of laser displacement sensor

Reference distance	150 mm
Measuring range	± 40 mm
Spot diameter	120 μm
Resolution	0.5 μm
Linearity	± 0.5 %

Table 2.2 Specification of robot

Positioning repeatability	± 0.08 mm
Load capacity	6 kg

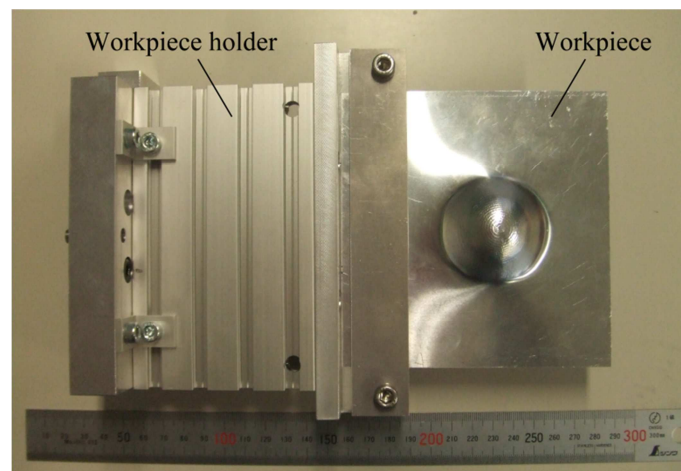


Fig. 2.2 Workpiece holder

2.2 測定ユニット

図 2.3 に測定ユニットの外観を示す。各レーザ変位計は直動・回転ステージ上に取り付けられており、回転 2 軸に加え、並進 2 軸あるいは 3 軸を有する。回転軸についてレーザ光軸回りには微調整を必要としないと考え除外し、片側のみ並進 3 軸とすることでレーザ変位計設置間距離を調整可能にした。レーザ光軸のずれは測定精度を悪化させるため、これらの調整機構を用いて 2 つの投光軸が一直線上になり、図 2.1 に示すロボットベース座標系 $\{R\}$ の Y_R 軸と平行になるよう調整する。光軸調整には直径 $100\mu\text{m}$ のピンホールを用いた。ピンホールをロボットに取り付けて Y_R 軸方向に動作させたとき、測定範囲内のすべての位置で 2 つのレーザ光がピンホールを通過することを目視で確認できる状態を調整確認の条件とした。

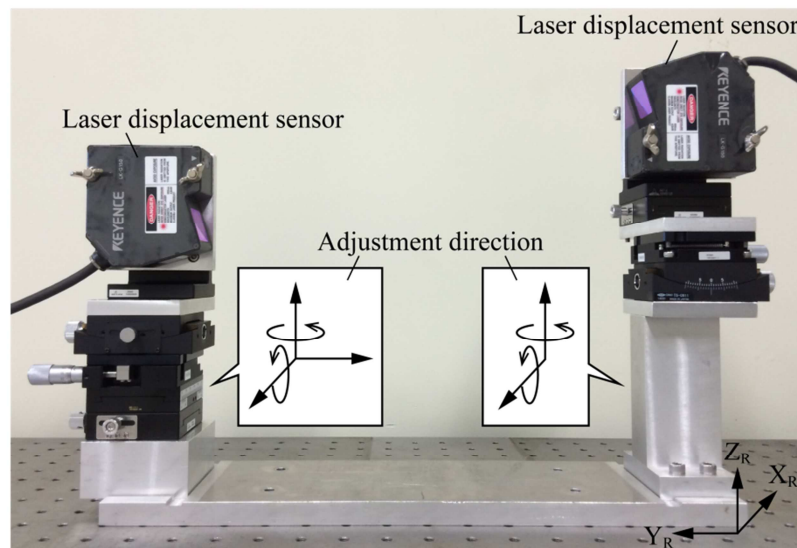


Fig. 2.3 Measuring unit

2.3 板厚測定原理

本システムに適用した板厚測定原理を図 2.4 に示す。一对のレーザ変位計間に測定対象物を挿入して各変位計と測定対象面までの距離 D_A , D_B を測定し、既知であるレーザ変位計設置間距離 D_C との差分として式(2.1)により板厚 T を算出する。本システムでは測定対象面の法線方向を板厚方向として定義する。形状測定により各測定点における法線方向を算出し、法線方向とレーザ光軸が一致する測定対象物の姿勢をロボットの動作により実現する。

なお、実際には光軸調整のためのレーザ変位計の姿勢調整により、レーザ変位計間の設置間距離は変化し、 D_A を正確に測定することは難しい。本システムでは厚みが既知の板をマスターワークとして使用し、マスターワークの厚みを基準値とする。マスターワークに

対する本システムでの板厚測定値を基準値として既知の厚みに設定することで、未知の板厚の測定対象物についても基準値からの差分として板厚が算出される。

$$T = D_A - (D_B + D_C) \quad (2.1)$$

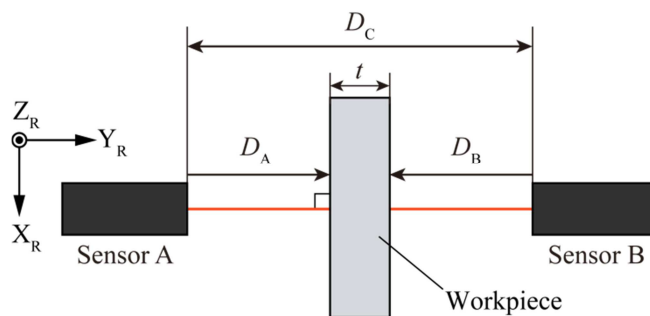
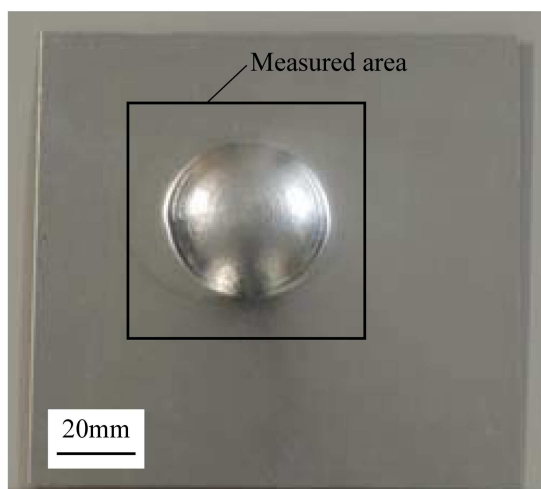


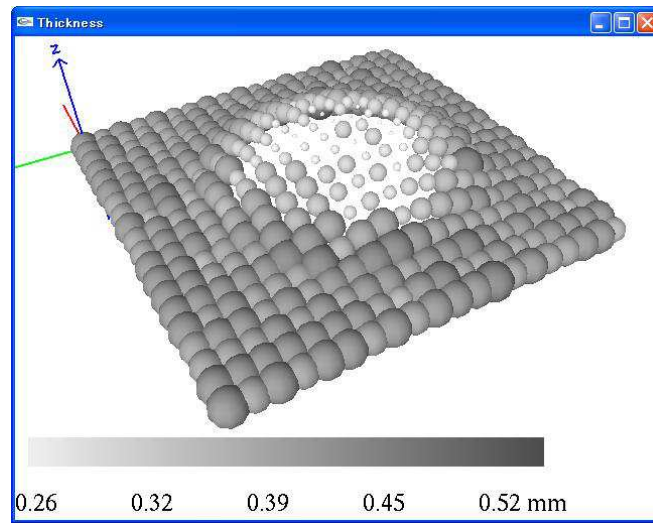
Fig. 2.4 Thickness measurement principle

2.4 測定結果描画

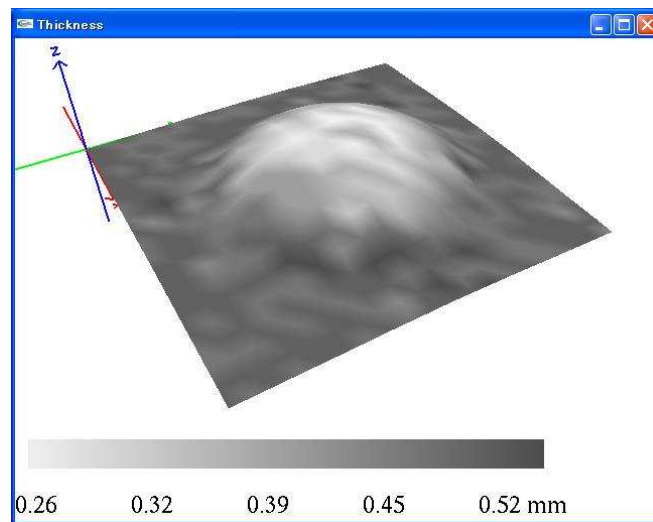
本システムでは、測定対象物の三次元形状上にカラースケール又はグレースケールのコンター図表示、又は大小の球表示を組み合わせることで板厚測定結果を描画することで作業員への提示を行う。作業員は描画角度を変更することで任意の視点から測定結果を確認することが可能である。図 2.5(a)に示す部分球形状の工作物に対して測定を行った場合の測定結果の提示例を図 2.5(b), (c)に示す。工作物の側面部分で板厚が減少していることが各描画方法において確認することができる。このような測定結果の可視化機能を備えることで、作業員の視覚的かつ直感的な評価を可能とする。



(a) Workpiece



(b) Display by sphere with grayscale



(c) Display by contour figure with grayscale

Fig. 2.5 Thickness distribution map

第3章 測定経路生成の基本手法

3.1 概要

2.3 で述べた板厚測定原理に基づいて実際の測定を行うためには、測定位置・姿勢を決定するための測定経路を生成する必要がある。また、本システムでは、実測定対象物形状に基づいた板厚方向の算出を目的として、形状測定と板厚測定の2種類の測定を実施する。よって、形状、板厚の各測定に対する測定経路が必要となる。形状測定では、測定ユニットのレーザ変位計1台のみを使用して測定対象物形状を測定し、板厚測定では2台のレーザ変位計を使用して、2.3 に示した原理に基づき測定を行う。

レーザ変位計に対する測定対象物の位置及び姿勢を一意に決定するためには、図3.1に示すように位置ベクトル \mathbf{P}_i 、レーザ照射軸方向を表す測定ベクトル \mathbf{M}_i 、レーザ変位計の向きを表し \mathbf{M}_i と直交する測定方向ベクトル \mathbf{D}_i の3つのベクトル情報が必要となる。レーザ変位計の向きとは図3.1に示すようにレーザ照射軸に対するレーザ受光方向を表し、 $(\mathbf{P}_i, \mathbf{M}_i, \mathbf{D}_i)$ ($i=1\sim N$, N :測定点数)の組を測定経路とする。また測定ユニット上についても、図3.2に示すように測定ユニットのレーザ光軸中心を測定中心位置ベクトル \mathbf{C} 、レーザ照射軸方向をレーザ照射ベクトル \mathbf{L} 、レーザ光軸から垂直に受光素子に向かう方向を受光方向ベクトル \mathbf{R} として設定する。本システムでは、 $(\mathbf{P}_i, \mathbf{M}_i, \mathbf{D}_i)$ が $(\mathbf{C}, \mathbf{L}, \mathbf{R})$ と一致するようにロボットを動作させることで測定を実現する。形状・板厚の各測定経路は測定対象物上に設定された測定物座標系に基づいて生成され、4節に詳細に示す座標変換を用いて測定物座標系での表現からロボット動作プログラムに変換される。

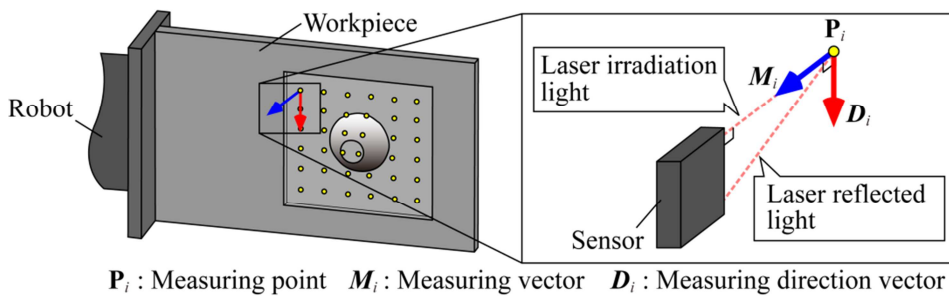


Fig. 3.1 workpiece model

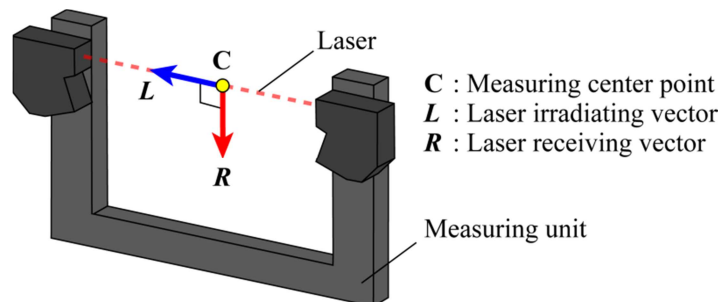


Fig. 3.2 Measuring unit model

3.2 形状測定経路

形状測定ではレーザ変位計に対して平行に測定対象物を走査させることで、測定対象物形状を取得する。形状測定経路は測定対象物の平面方向を X_W - Y_W 平面，鉛直方向を Z_W 方向として設定した測定物座標系 $\{W\}$ に基づいて生成され（図 3.3），測定物座標系の Z_W 方向をレーザ光軸と一致させ， X_W - Y_W 方向に走査して測定を行うことで， Z_W 方向の変位量を測定対象物高さとして測定する。測定物座標系の原点位置について， X_W - Y_W 方向は測定開始位置とし， Z_W 方向はロボットのメカニカルインタフェース中心に一致する位置とする。このためには測定物ホルダにメカニカルインタフェース中心と一致する X_W - Y_W 平面を設け，この平面上にてレーザ変位計のゼロ値を設定して測定を行う。また測定のためのパラメータとしては，測定開始位置，測定範囲，測定間隔を決定することで X_W - Y_W 平面上に格子状の測定点群を生成する。よって，形状測定経路は X_W - Y_W 平面上に格子状に整列した形状測定対象点 P_{Si} ， Z_W 方向を表す形状測定ベクトル M_{Si} ，レーザ受光方向を表す測定方向ベクトル D_{Si} の組 (P_{Si}, M_{Si}, D_{Si}) ($i=1\sim N$, N :測定点数)となる。

円錐台形状に加工された測定物に対する形状測定経路を図 3.3 に示すが， D_{Si} は X_W 方向を表す方向とする。なお， D_{Si} は X_W または Y_W 方向と一致させることで取扱いが容易になるが，測定ユニットとロボットの位置関係を考慮して，測定ユニットに対して横方向からロボットハンドが挿入されるように X_W 方向と一致させることとした。 (P_{Si}, M_{Si}, D_{Si}) が (C, L, R) に一致するようにロボットを動作させて $+Z_W$ 方向側のみのレーザ変位計の測定値を取得する。形状測定結果は測定物座標系に基づいて得られ，得られた形状点群は板厚測定対象点 P_{Ti} として定義する。

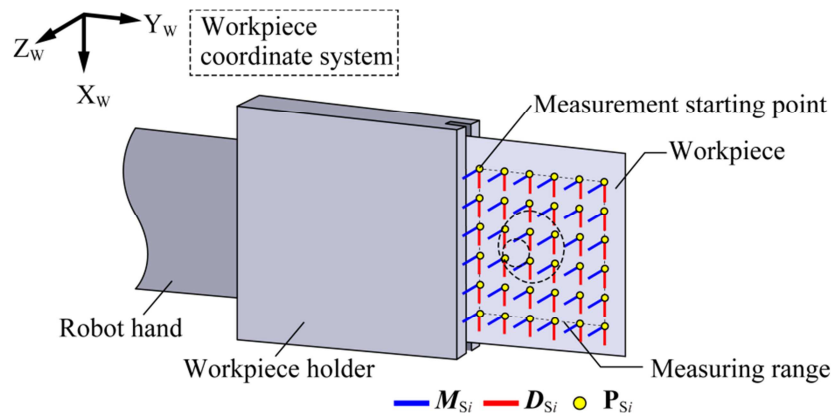


Fig. 3.3 Shape measurement path based on workpiece coordinate system

3.3 板厚測定経路

形状測定から取得した \mathbf{P}_{Ti} において，隣り合う板厚測定対象点座標との差分から外積計算を用いて，測定物表面の法線方向を表す板厚測定ベクトル \mathbf{M}_{Ti} と測定方向ベクトル \mathbf{D}_{Ti} を算出し，板厚測定経路 $(\mathbf{P}_{Ti}, \mathbf{M}_{Ti}, \mathbf{D}_{Ti})$ とする．形状測定と同様にロボットと測定ユニットの位置関係を考慮して，受光方向ベクトルは， \mathbf{M}_{Ti} に垂直で X_W - Z_W 平面に一致するベクトルとする．なお，厳密には測定物の表裏でこれらの値は異なるが，対象とする測定物は薄板であるため同一であるとみなす．

6 章では，上記のように測定原理に基づいた測定経路においてレーザと測定物との幾何学的な干渉が生じる場合にレーザ照射方向を傾斜させる測定方法について述べるが，レーザを傾斜させた測定と区別するために，測定原理に基づいて生成された板厚測定姿勢を「基本姿勢」と定義する．

図 3.3 に示した円錐台形状に対する板厚測定経路を図 3.4 に示す．板厚測定では形状測定結果に応じて各測定点に測定姿勢が生成される． $(\mathbf{P}_{Ti}, \mathbf{M}_{Ti}, \mathbf{D}_{Ti})$ が $(\mathbf{C}, \mathbf{L}, \mathbf{R})$ に一致するようにロボットを動作させて板厚測定値を取得する．

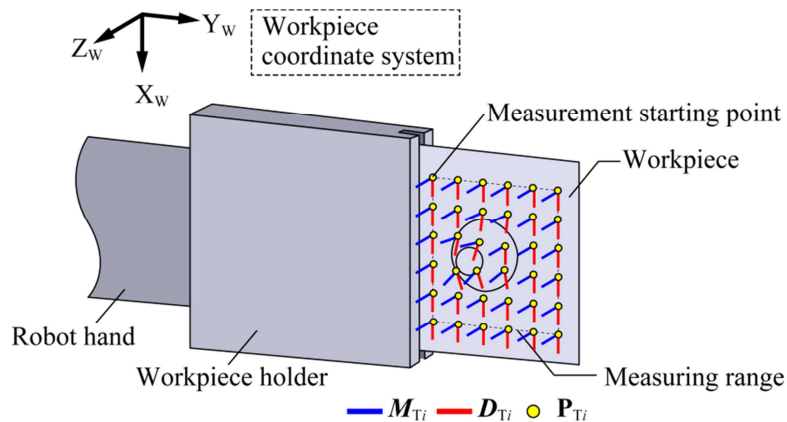


Fig. 3.4 Thickness measurement path based on workpiece coordinate system

3.4 ロボット動作プログラムの生成

3.2, 3.3 に示したように測定物座標系を基準として生成した測定経路に基づいて実際の測定を行うためには，測定経路に対して座標変換を行い，ロボットベース座標系に基づいて記述されたロボット動作プログラムへと変換する必要がある．本システムにおいて主に用いる座標系は，ロボットベース座標系と測定物座標系の 2 種類であるが，座標変換には図 3.5 に示す 5 つの座標系を使用する．各座標系については以下に説明する．なお，本節にお

いては，すでに定義したロボットベース座標系{**R**}，ロボットハンド座標系{**H**}，測定物座標系{**W**}についても便宜上 O_i として定義して使用する．

(1)ロボットベース座標系 O_0

ロボットのベース座標系であり，ロボットに与える動作プログラムは O_0 を基準にして記述される．

(2)ロボットハンド座標系 O_1

ロボットハンド先端フランジ面の座標系を示す．

(3)測定物座標系 O_2

測定物の測定開始位置上に設定した座標系を示す．

(4)測定対象点座標系 $O_{3i} (i=0\sim N)$

測定物の各測定対象点上に設定した座標系を示す．

(5)測定ユニット座標系 O_4

測定ユニット上に設定した座標系を示す．板厚測定位置となるレーザ光軸中心を原点とし，レーザ照射方向を Z 軸，レーザ照射方向に対するレーザ受光部の方向を X 軸とする．X 軸レーザ変位計の設置上，鉛直方向となる．

図 3.5 の jA_i は座標系 O_j から見た座標系 O_i を表すための同次変換行列を表したものであり，次式によって与えられる． jR_i は 3×3 の回転行列を示し， jP_i は平行移動を表すベクトルである．

$${}^jA_i = \left[\begin{array}{c|c} {}^jR_i & {}^jP_i \\ \hline 0 & 1 \end{array} \right] \quad (3.1)$$

また，ロボットに動作プログラムとして与える値は， O_3 が O_4 と一致するときの O_0 から見た O_1 の位置座標と姿勢であるため，ここでは同次変換行列 0A_1 を求める必要がある． O_3 が O_4 と一致する場合の同次変換行列の関係は，

$${}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 = {}^0A_4 \quad (3.2)$$

となるため， 0A_1 は以下のように算出される．

$${}^0A_1 = {}^0A_4 {}^2A_3^{-1} {}^1A_2^{-1} \quad (3.3)$$

ここで， 2A_3 は測定物座標系に基づいた各測定点の座標系となり，測定経路(P_i, M_i, D_i)から以下のように表される．

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{P} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{D} & \mathbf{N} & \mathbf{M} & \mathbf{P} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_x & n_x & m_x & p_x \\ d_y & n_y & m_y & p_y \\ d_z & n_z & m_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

ここで、 \mathbf{N} は \mathbf{M} と \mathbf{D} の外積として次式で表される。

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} n_x & n_y & n_z \end{bmatrix}^T = \mathbf{M} \times \mathbf{D} \quad (3.5)$$

また 1A_2 については測定物ホルダの寸法， 0A_4 についてはロボットと測定ユニットの位置関係を測定することで決定することができる。これらの同時変換行列の値と式(3.2)から 0A_1 を算出することが可能となるが、ロボット動作プログラムでは 3 つの回転角度で姿勢を与える必要があるため、 0A_1 の \mathbf{R} から回転角度を算出する。本システムで使用するロボットハンド先端の姿勢角は XYZ 固定角によって表現されるため、XYZ 各軸回りの回転角度を (γ, β, α) とすると、 \mathbf{R} は式(3.6)で与えられる[1]。 \mathbf{R} を式(3.7)のようにおき、 $-90^\circ < \beta < 90^\circ$ である場合、回転角度は式(3.7)により求められる。

$$\mathbf{R}(\gamma, \beta, \alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \\ \sin \alpha \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$\mathbf{R}(\gamma, \beta, \alpha) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{23} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} \beta &= A \tan 2 \left(-r_{31}, \sqrt{r_{11}^2 + r_{21}^2} \right) \\ \alpha &= A \tan 2 \left(\frac{r_{21}}{\cos \beta}, \frac{r_{11}}{\cos \beta} \right) \\ \gamma &= A \tan 2 \left(\frac{r_{32}}{\cos \beta}, \frac{r_{33}}{\cos \beta} \right) \end{aligned} \quad (3.8)$$

本研究で用いたロボット（(株) 安川電機，HP6）の動作プログラム例を図 3.6 に示す。各測定点に対してロボットハンド先端の移動速度，座標，姿勢を記述したデータを羅列したデータを動作プログラムとして与える。

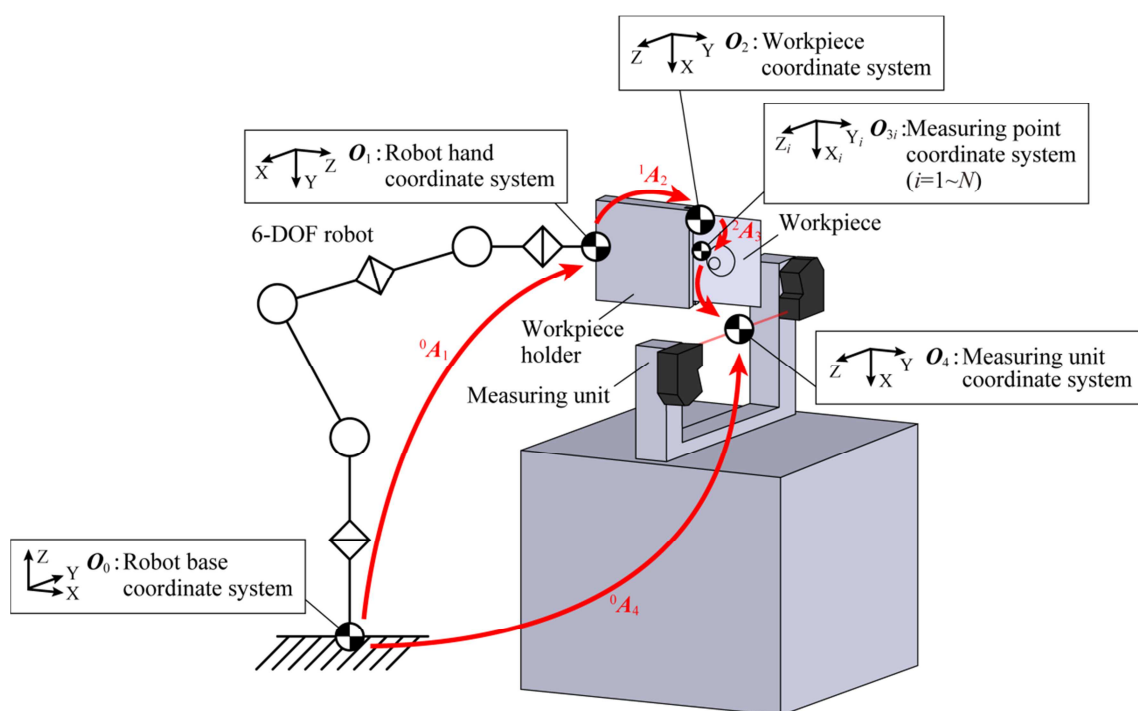


Fig. 3.5 Coordinate systems on the thickness measurement system

Measurement point number	1	0,10.00,0,814.029,-218.434,423.733,90.00,-0.68,137.87,0,0,0,0,0,0,0
	2	0,10.00,0,811.497,-215.802,424.783,90.00,-0.92,136.82,0,0,0,0,0,0,0
	3	0,10.00,0,811.648,-215.954,425.714,90.00,-0.59,136.86,0,0,0,0,0,0,0
	4	0,10.00,0,813.807,-218.197,426.653,90.00,-0.30,137.74,0,0,0,0,0,0,0
	5	0,10.00,0,811.588,-215.866,427.499,90.00,0.45,136.75,0,0,0,0,0,0,0
<hr/>		
	362	0,10.00,0,810.480,95.750,431.726,90.00,-0.66,42.04,0,0,0,0,0,0,0
	363	0,10.00,0,811.422,96.507,432.634,90.00,-0.21,41.71,0,0,0,0,0,0,0
	364	0,10.00,0,812.084,97.043,433.781,90.00,-0.93,41.52,0,0,0,0,0,0,0
		Speed Robot hand coordinate Robot hand posture
		(x, y, z) (γ, β, α)

Fig. 3.6 Example of robot program

参考文献

- [1] J. J. Craig, ロボティクス—機構・力学・制御—, 共立出版, 1991.

第4章 測定精度の推定

4.1 概要

本章ではシステムの主な誤差要因について検証し、基本手法で生成される測定経路に基づいた板厚測定に対する本システムの板厚測定誤差を推定する。そして、基本的な形状として平面及び、半円筒面に対しての測定実験より推定した板厚測定誤差の検証を行う。測定精度推定における測定条件としては、板厚は一般的に薄板に分類される 0.5～5mm、測定間隔は 0.5～数 mm 程度とする。

板厚測定誤差 E_T は、測定対象面の平面方向に対する位置及び、測定対象面に対する姿勢の物理的なずれ量とセンサのスキヤニング誤差に起因するが、位置・姿勢誤差にはロボット、レーザ変位計というシステムを構成する各要素が誤差要因となる。ここで、センサのスキヤニング精度とは、センサに起因する測定値のばらつきを指す。実際には、板厚測定において測定対象面の法線方向に対しても図 4.1 に示すような位置決め誤差が発生するが、センサ A に対して $-e_V$ の誤差が生じた場合、センサ B には $+e_V$ の誤差が生じるため、板厚 T は次式により与えられる。

$$\begin{aligned} T &= D_C - \{(D_A - e_V) + (D_B + e_V)\} \\ &= D_C - (D_A + D_B) \end{aligned} \quad (4.1)$$

つまり、2 つのセンサの測定結果から e_V は相殺されるため、測定対象面の垂直方向に対する位置決め誤差は板厚測定に影響を与えない。

本システムにおける真の板厚測定対象点は、測定物座標系に基づいて定義し、X-Y 方向はロボットの絶対位置決め誤差を含む実際の形状測定位置、Z 方向はその形状測定位置での実工作物高さとする。よって、図 4.2 に示すように測定位置決め誤差 E_P は、ロボットの繰り返し位置決め誤差 E_{RR} と形状測定誤差から生じる位置決め誤差 E_S の合成誤差となり、測定姿勢誤差 θ_N はロボットの角度誤差 θ_R と形状測定誤差から生じる法線ベクトルの角度誤差 θ_S の合成誤差となる。合成方法は誤差の性質に応じて決定するため、ここでは E_P 、 θ_N を下記のようにおく。

$$E_P = f(E_{RR}, E_S) \quad (4.2)$$

$$\theta_N = f(\theta_R, \theta_S) \quad (4.3)$$

また本研究では、図 4.3 に示すように注目する板厚測定対象点の法線ベクトルは隣接する周辺点群座標から近似的に算出する。つまり、算出された法線ベクトルは測定間隔を半径とする領域内の形状点群座標を近似した平面に対する法線ベクトルであり、この法線ベクトルに基づく板厚測定のためには、近似された円領域の半径以下となる位置決め精度が必要

となる．測定間隔を d ，円領域の半径を r とすると，

$$r \geq d \quad (4.4)$$

であり，周辺形状点群から算出した法線ベクトルに基づいた板厚測定に必要な位置決め精度は，

$$E_P \leq r \quad (4.5)$$

となる．この条件を満たす場合，板厚測定誤差 E_T は θ_N による測定誤差 E_N とスキヤニング誤差 E_{SC_T} の合計となる．

$$E_T = E_N + E_{SC_T} \quad (4.6)$$

ここで，システムの誤差要因はロボット，センサについて下記のように分類される．

- | | |
|-------------|------------|
| (1)ロボット動作精度 | (i) 位置決め精度 |
| | (ii) 姿勢精度 |
| | (iii) 直線性 |
| (2)センサ特性 | (i) 表面性状 |
| | (ii) 測定距離 |
| | (iii) 照射角度 |
| | (iv) 直線性 |

2, 3 節では，これらの誤差要因についての検証結果を示す．なお，各誤差の評価方法について，角度誤差は最大値，ロボットの絶対位置決め誤差は平均値を評価し，その他の誤差は正規分布に従って発生する誤差であるとして標準偏差の 3 倍を評価する．

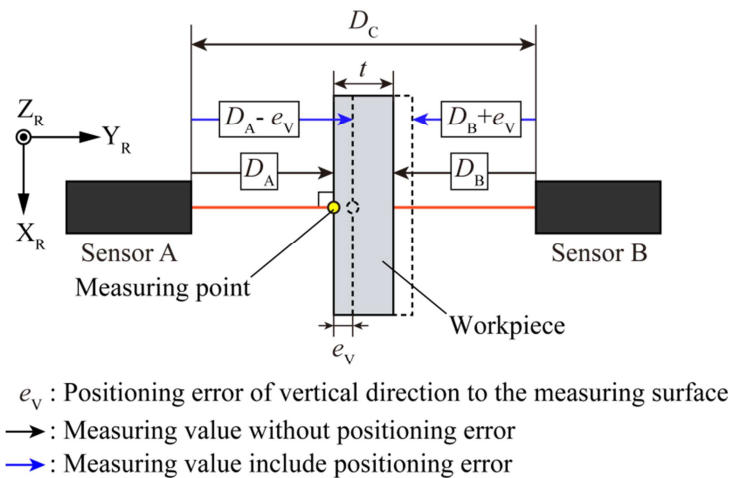
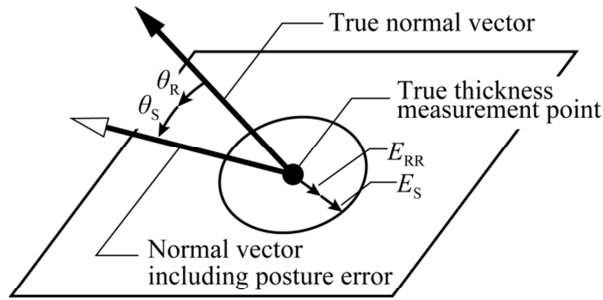


Fig. 4.1 Positioning error of vertical direction to measurement surface



E_{RR} : Positioning repeatability of the robot
 E_S : Positioning error due to the shape measurement error
 θ_R : Angular error of the robot
 θ_S : Angular error due to the shape measurement error

Fig. 4.2 Error model for thickness measurement

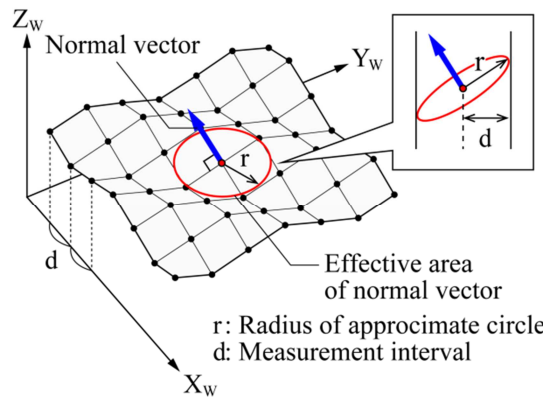


Fig. 4.3 Normal vector calculated from shape data

4.2 ロボット動作精度

(i) 位置決め精度

絶対・繰返し位置決め精度の検証実験として、システムで使用する作業領域内に基準点を設け、基準点から各軸方向へ 8, 50, 100, 175mm の移動量を与えた時の移動誤差を 5 回ずつ測定した。移動距離の基準として、8mm はゲージブロック、その他についてはマイクロメータの基準棒を使用し、ダイヤルゲージ(目量 0.01mm)を用いて測定した。移動誤差の平均値を絶対位置決め誤差 E_{RA} として評価し、移動誤差の標準偏差 σ_{RR} から繰返し位置決め誤差 E_{RR} を

$$E_{RR} = 3\sigma_{RR} \quad (4.7)$$

として評価した。実験結果を図 4.4 に示す。 E_{RA} は Y_R 方向に 175mm の位置において最大値 $E_{RA_max}=0.419\text{mm}$ となった。 X_R , Y_R 方向については作業範囲が広がるにつれて誤差は増大すると考えられる。 σ_{RR} は Z_R 方向において最大値 $\sigma_{RR_max}=7.7\mu\text{m}$ であるため、式(4.7)より、

$$E_{RR} = 3 \times 7.7 = 23.1 \mu\text{m} \quad (4.8)$$

となる.

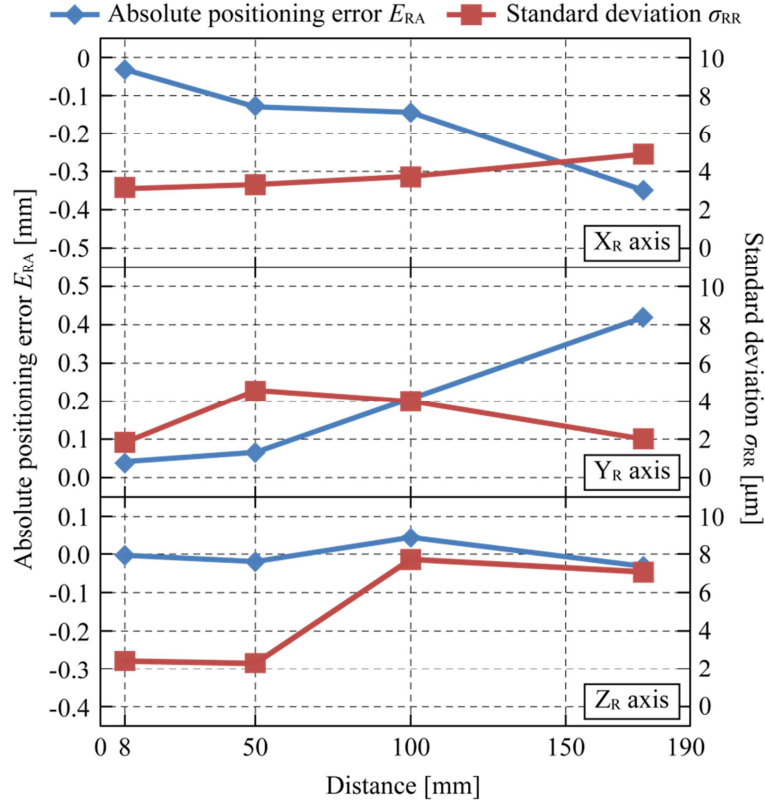


Fig. 4.4 Absolute positioning error and standard deviation of positioning error of the robot

(ii) 姿勢精度

ロボット先端姿勢に -50° ~ 50° の指令値を 5° 間隔で与えた場合の角度誤差 θ_R を評価した. 測定器にはダイヤルゲージ(目量 0.01mm)を用い, 傾斜させたロボットに移動量を与えて2箇所を測定し, 測定値の差分と移動量から角度を算出した. 本システムではレーザ光軸を Y_R 軸に一致させるため, 検証する回転方向は測定面へのレーザ入射角度に影響する X_R , Z_R 軸回りとした. 実験結果を図4.5に示す. 最大誤差は Z_R 軸回りで $\theta_{R_Z\max}=-1.1^{\circ}$, X_R 軸回りで $\theta_{R_X\max}=-0.8^{\circ}$ となり, 傾斜角度に比例して増大する結果となった. 各軸回りに最大誤差をもつベクトルと Y_R 軸が成す角度は 1.4° となるため, θ_R は以下となる.

$$\theta_R = 1.4^{\circ} \quad (4.9)$$

(iii) 直線性

X_R , Z_R 軸方向に直線動作させた場合の Y_R 軸方向への位置決め誤差を測定し, 位置決め誤差の標準偏差 σ_{RL} からロボットの直線性精度 E_{RL} を

$$E_{RL} = 3\sigma_{RL} \quad (4.10)$$

として評価した．測定器にはレーザ変位計((株)キーエンス，LK-G150)を使用し，センサのスキヤニング誤差の影響を減少させるために，取得したデータに対して移動平均を行った．形状測定では X_R - Z_R 平面方向にロボットが動作し， Y_R 軸方向から測定するため， X_R ， Z_R 軸方向に動作した場合の Y_R 軸方向への位置決め誤差が形状測定誤差に影響する．作業範囲内において 100mm 動作させた場合の直線性測定結果を図 4.6 に示す．P-P 値は X_R 軸方向において最大値 $P-P_{\max}=47.2\mu\text{m}$ となった．このとき $\sigma_{RL}=9.5\mu\text{m}$ となるため，式(4.10)より，

$$E_{RL}=3\times 9.5=28.5\mu\text{m} \quad (4.11)$$

となる．

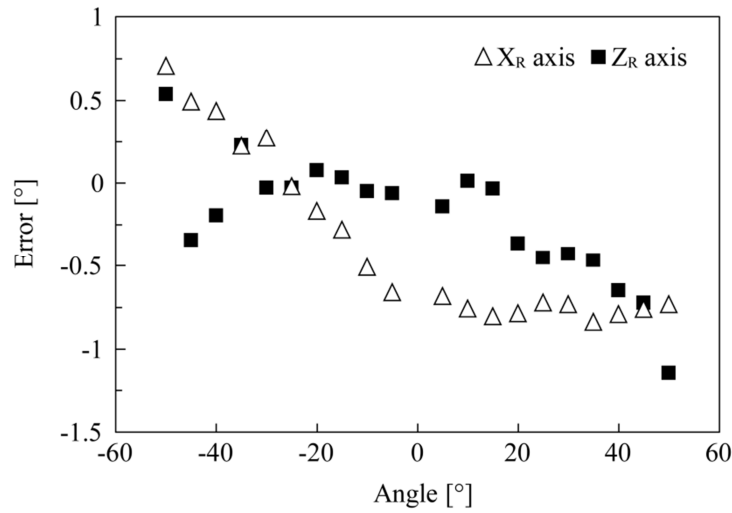


Fig. 4.5 Posture error of the robot

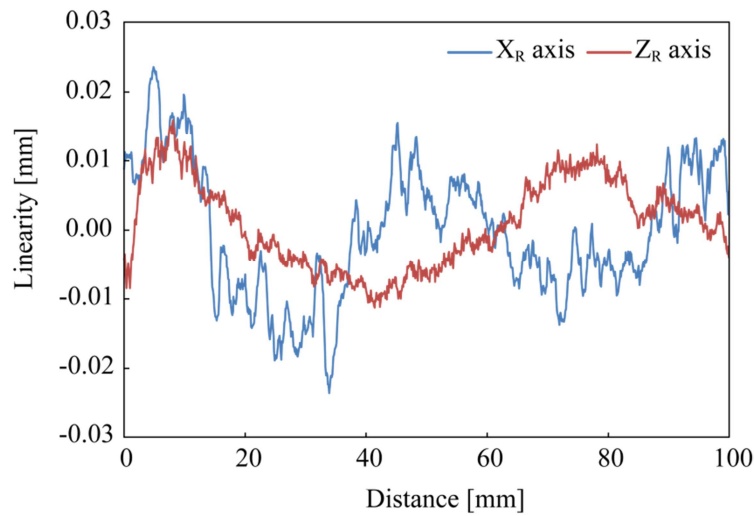


Fig. 4.6 Linearity of the robot

4.3 センサ特性

(i) 表面性状

プレス製品等で使用される一般的な材料であるアルミ圧延材(R_a 0.163 μm)に対して艶消しスプレーを塗布してスキヤニングを行い、素地との比較を行った。基準距離位置において測定長さ 30mm, 測定間隔 0.1mm で測定した結果を図 4.7 に示す。素地では測定表面状態の影響を受けて突発的に測定誤差が増大する箇所がある。一方、艶消しスプレー塗布面は、ばらつきが減少していることがわかる。使用するセンサが拡散反射型であるため、艶消しスプレーにより表面光沢を抑えることで測定が安定すると考えられる。標準偏差は素地で $\sigma_B=22\mu\text{m}$, 艶消しスプレー塗布面で $\sigma_{SP}=14\mu\text{m}$ となった。よって、以後のセンサ特性検証実験においては、測定面に艶消しスプレーを塗布して測定を行った。

(ii) 測定距離

センサからの距離を変更した平面(R_a 0.075 μm)に対するスキヤニングを行った。測定長さ 30mm, 測定間隔 0.1mm, 測定距離+40, +20, 0(基準距離), -20, -40mm として測定した場合の、P-P 値 E_{D_P-P} と標準偏差 σ_D を図 4.8 に示す。 E_{D_P-P} , σ_D 共に測定距離に比例して増大する傾向となり、最大は-40mm において $E_{D_P-P_max}=98.8\mu\text{m}$, $\sigma_{D_max}=16.7\mu\text{m}$ となった。よって、すべての距離での測定が考えられる形状測定におけるスキヤニング精度 E_{SC_S} は

$$\begin{aligned} E_{SC_S} &= 3\sigma_{D_max} \\ &= 3 \times 16.7 = 50.1 \mu\text{m} \end{aligned} \quad (4.12)$$

とする。また板厚測定では測定面は常にセンサの基準位置となるので、0mm における標準偏差 $\sigma_{D_0mm}=14.3\mu\text{m}$ から板厚測定におけるスキヤニング精度 E_{SC_T} は

$$\begin{aligned} E_{SC_T} &= 3\sigma_{D_0mm} \\ &= 3 \times 14.3 = 42.9 \mu\text{m} \end{aligned} \quad (4.13)$$

とする。

(iii) 照射角度

測定面を変位計の受光系方向、幅方向に傾斜させた場合の測定誤差 E_{SA} を評価した。回転ステージを用いて傾斜角を与え、傾斜範囲は-70~70°, 間隔は 1°とした。実験概要を図 4.9 に、実験結果を図 4.10 に示す。各傾斜方向で $\pm 50^\circ$ 付近を境に角度の増大に応じて誤差が増大する傾向となった。これは、傾斜角度の増大に応じてレーザ変位計受光部で検出される受光量が減少するためと考えられる。また受光系方向に傾斜させた場合、傾斜角度が 6~10°程度の範囲において測定誤差が増加した。これは、センサ光学系の配置から正反射成分の受光量が急激に増加したためと考えられる。つまり $\pm 50^\circ$ の範囲内では、正反射の影響を

受ける角度以外では照射角度は測定精度に影響しないといえる． よって本システムでは傾斜角度 $\pm 50^\circ$ 以内の面を測定対象とする．

(iv) 直線性

センサ仕様より測定範囲内における直線性は $\pm 0.05\%$ であるため，最大誤差は $\pm 40\mu\text{m}$ となる． ここで標準偏差を σ_{SL} とし， $4\sigma_{\text{SL}}=40\mu\text{m}$ であるとする，センサの直線性精度 E_{SL} は

$$E_{\text{SL}} = 3\sigma_{\text{SL}} = 30 \mu\text{m} \quad (4.14)$$

となる．

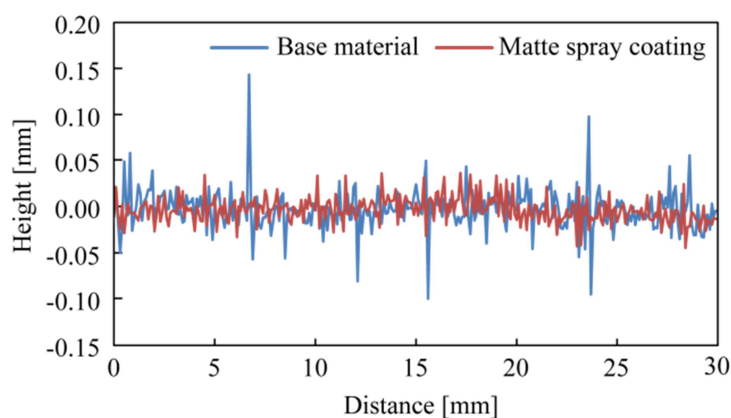


Fig. 4.7 Influence of surface properties

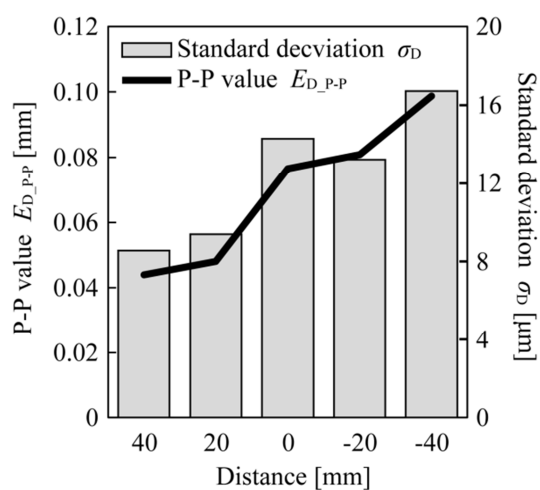


Fig. 4.8 Relationship between measurement distance and error

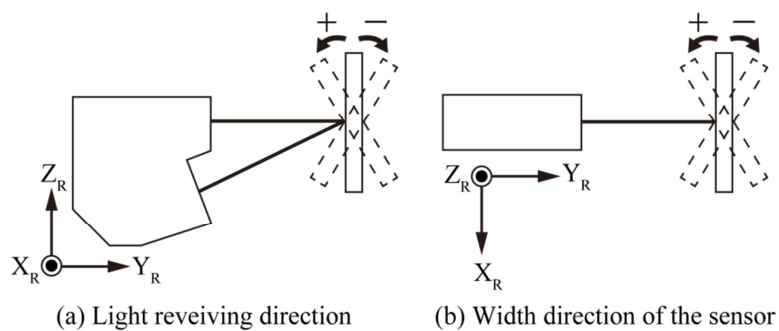


Fig. 4.9 Relationship between rotational direction and sensor

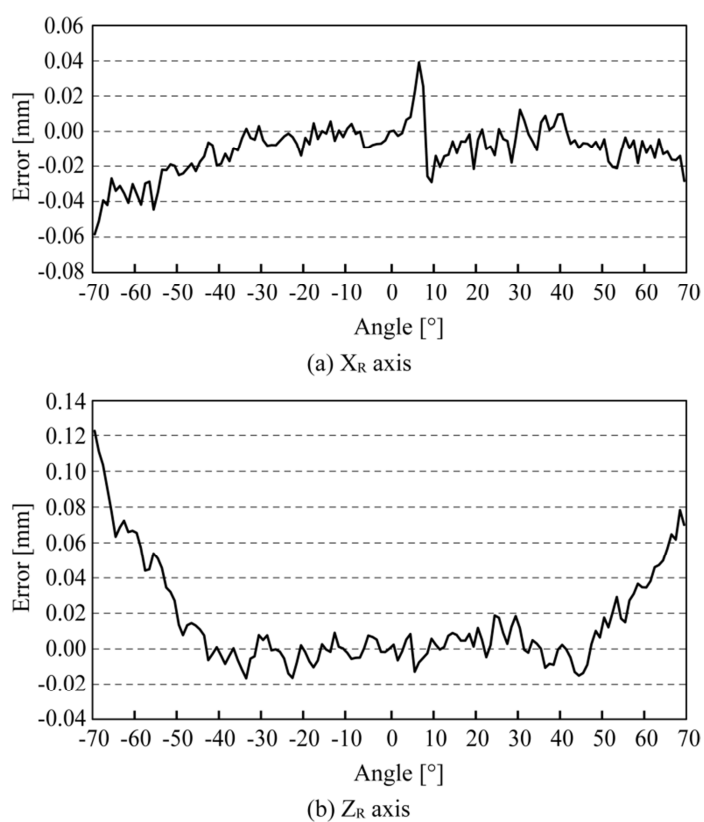


Fig. 4.10 Relationship between inclination angle and measurement error

4.4 誤差推定

誤差要因から測定位置決め誤差 E_P , 測定姿勢誤差 θ_N , 板厚測定誤差 E_T を推定する.

まず E_P について推定する. E_P は式(4.2)に示すように E_{RR} と E_S によって決定され, E_{RR} は正規分布に従って生じると見なすことができ, 式(4.8)より既知である. また, E_S は形状測定誤差 E_H に起因する位置決め誤差であり, E_H の誤差要因としては, ロボット直線性 E_{RL} ,

センサ直線性 E_{SL} ，センサの平面スキヤニング精度 E_{SC_S} が挙げられる．これらはすべて正規分布に従って生じる誤差と見なすことができるため， E_P は二乗和平方根を用いて下記のように算出される．

$$E_P = \sqrt{E_{RR}^2 + E_S^2} \quad (4.15)$$

同様に E_H は，下記のように求められる．

$$\begin{aligned} E_H &= \sqrt{E_{RL}^2 + E_{SL}^2 + E_{SC_S}^2} \\ &= \sqrt{28.5^2 + 30.0^2 + 50.1^2} \\ &= 65.0 \mu\text{m} \end{aligned} \quad (4.16)$$

E_H に起因する測定面方向の位置決め誤差である E_S は，測定面の傾斜角度に比例して増大するため，対象とする最大傾斜角度 50° において最大となる．

$$\begin{aligned} E_S &= E_H \times \sin 50^\circ \\ &= 65.0 \times \sin 50^\circ \\ &= 49.8 \mu\text{m} \end{aligned} \quad (4.17)$$

よって，式(4.8)，(4.15)，(4.17)より測定位置決め誤差 E_P は

$$\begin{aligned} E_P &= \sqrt{E_{RR}^2 + E_S^2} \\ &= \sqrt{23.1^2 + 49.8^2} = 54.9 \mu\text{m} \end{aligned} \quad (4.18)$$

となる．本システムで設定する測定間隔は 0.5mm 以上とするため，式(4.4)(4.5)より E_P は必要精度を満たしているといえる．

次に，測定姿勢誤差 θ_N を推定する． θ_N は式(4.3)に示すように θ_R と θ_S によって決定される．4.2(ii)より θ_R は傾斜角度に比例して増大するため， θ_N は正規分布に従わない要素を持つ．そのため， θ_N は下記のように単純和を用いて算出した．

$$\theta_N = \theta_R + \theta_S \quad (4.19)$$

θ_R は式(4.9)より既知であるため，ここでは形状測定誤差に起因する法線ベクトルの角度誤差 θ_S を推定する．形状測定においては X_W - Y_W 平面が X_R - Z_R 平面に一致する．このときロボットは X_W ， Y_W 方向に動作し， Z_W 方向からレーザが照射されるため， θ_S は X_W ， Y_W 方向へのロボットの絶対位置決め誤差 E_{MI} と， Z_W 方向の測定誤差 E_H に起因する．ここで E_{MI} は距離に比例して増大するため， θ_S についても単純和を用いて算出することとし， E_{MI} ， E_H に起因する角度誤差をそれぞれ θ_{MI} ， θ_H とすると，

$$\theta_S = \theta_{MI} + \theta_H \quad (4.20)$$

となる．ここで，本研究では法線ベクトルの算出に隣接する測定点の座標を用いることから， E_{MI} は測定間隔とする距離における絶対位置決め誤差とする．本システムでは測定間隔は 0.5mm から数 mm 程度に設定するため，4.2(i)より 8mm 移動時における絶対位置決め誤

差の最大値を E_{MI} とする.

$$E_{MI} = 32 \mu\text{m} \quad (4.21)$$

X_W , Y_W 方向に対して E_{MI-X} , E_{MI-Y} が生じたとすると, θ_{MI} は, X_W , Y_W 方向への測定面傾斜角度 θ_X , θ_Y と測定間隔 d に応じて, 以下のように決定される.

$$\theta_{MI} = \cos^{-1} \left[\frac{\tan^2 \theta_X (d + E_{MI-X}) + \tan^2 \theta_Y (d + E_{MI-Y}) + d}{\sqrt{\tan^2 \theta_X + \tan^2 \theta_Y + 1} \sqrt{\{\tan \theta_X (d + E_{MI-X})\}^2 + \{\tan \theta_Y (d + E_{MI-Y})\}^2 + d^2}} \right] \quad (4.22)$$

一方, θ_H は θ_{MI} と同様に, X_W , Y_W 方向に対して E_{H-X} , E_{H-Y} が生じたとすると, X_W , Y_W 方向への測定面傾斜角度 θ_X , θ_Y と測定間隔 d に応じて, 以下のように決定される.

$$\theta_H = \cos^{-1} \left\{ \frac{\tan \theta_X (d \tan \theta_X + E_{H-X}) + \tan \theta_Y (d \tan \theta_Y + E_{H-Y}) + d}{\sqrt{\tan^2 \theta_X + \tan^2 \theta_Y + 1} \sqrt{(d \tan \theta_X + E_{H-X})^2 + (d \tan \theta_Y + E_{H-Y})^2 + d^2}} \right\} \quad (4.23)$$

最大傾斜角度は, 測定対象範囲である $\pm 50^\circ$ とする. θ_S の大きさは E_{MI} , E_H の誤差方向の組合せによって異なるが, θ_S は傾斜角度が大きいほど小さくなる傾向となり, E_{MI} , E_H の組合せが変わっても同様の傾向を示した. $d=0.5\sim 5\text{mm}$ までの測定間隔に応じた θ_S の最大値を図 4.11 に示す. θ_{MI} が占める割合はすべての測定間隔において 10~11% 程度であり, 測定間隔が小さいほど θ_S が大きいことが分かる. θ_S の推定は, 適用した測定間隔に応じて行い, 各測定間隔における最大値を θ_S とする. また, θ_{MI} と θ_H が占める割合は傾斜角度に応じて変化する. θ_{MI} は傾斜角度 0° ではゼロであり, 傾斜角度に比例して増大する. 一方, θ_H は減少するため, θ_{MI} が占める割合が傾斜角度に比例して増大して, 最大では 55% 程度となるが, θ_S は減少するため θ_{MI} の影響は絶対的には小さい. このような傾斜角度ごとの割合は, E_{MI} と E_H の組合せが同じ場合, 測定間隔によらずほぼ一定である. 式(4.9), (4.19), (4.20)より θ_N は算出され, 真の板厚を T とすると, θ_N から算出される板厚誤差 E_N は,

$$E_N = \frac{T(1 - \cos \theta_N)}{\cos \theta_N} \quad (4.24)$$

となる. 式(4.6), (4.13), (4.24)より, 測定間隔, 板厚に応じた E_T を表 4.1 に示す. E_T は板厚が大きく, 測定間隔が小さいほど増大する結果となった.

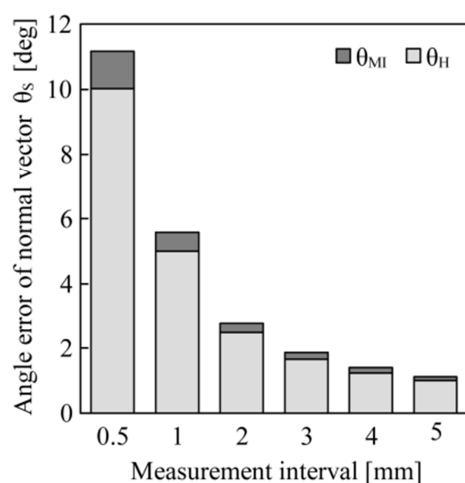


Fig. 4.11 Relationship between θ_s and measurement interval d

Table 4.1 Thickness error E_T

		Thickness [mm]					
		0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
Measurement interval [mm]	0.5	55.2	67.4	92.0	116.5	141.1	165.6
	1.0	46.6	50.4	57.8	65.3	72.7	80.2
	2.0	44.2	45.6	48.3	50.9	53.6	56.3
	3.0	43.7	44.5	46.1	47.8	49.4	51.0
	4.0	43.5	44.1	45.3	46.5	47.7	48.9
	5.0	43.4	43.9	44.8	45.8	46.8	47.7

[μm]

4.5 測定実験

4.5.1 平板

平板についての板厚測定精度検証を行った。図 4.12 に示すゲージブロックを測定対象物とした。形状測定時のセンサからの測定物までの距離を変更して、形状測定距離が板厚測定精度に与える影響について検証した。測定条件を表 4.2 に、板厚分布図を図 4.13 に示す。また、各測定結果の最大板厚誤差、P-P 値、標準偏差を図 4.14 に示す。本実験では板厚 2mm、測定間隔 1mm であるため、4 節より板厚誤差 $E_T=57.8\mu\text{m}$ と推定されるが、すべての測定位置において推定値以下の板厚誤差となった。また、P-P 値、標準偏差は 40mm において最大値となり、 $P-P_{\max}=0.094\text{mm}$ 、 $\sigma_{\max}=0.017\text{mm}$ だった。傾向としては、P-P 値、標準偏差共に測定距離に比例して大きくなる結果となったが、-20~20mm の範囲においてはほぼ同程度の測定精度といえる結果となった。



Fig. 4.12 Workpiece

Table 4.2 Experimental conditions

Workpiece	Thickness	2 mm
	Surface	R_a 0.012 μ m, Matte spray coating
Range		7 \times 7 mm
Interval		1 mm
Distance		+40, +20, 0, -20, -40 mm

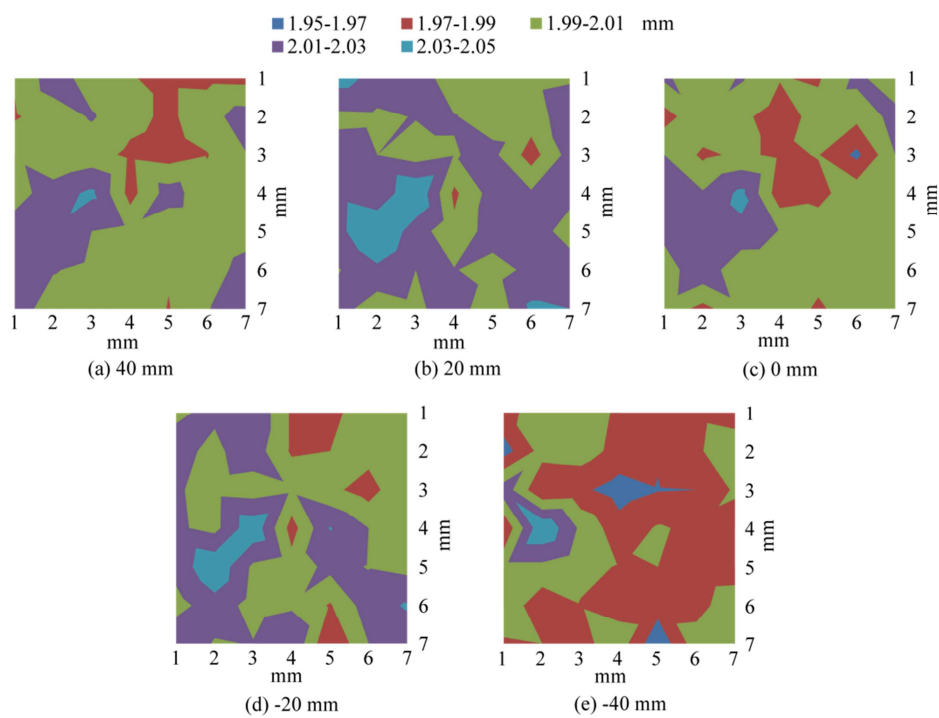


Fig. 4.13 Thickness distribution map of plate

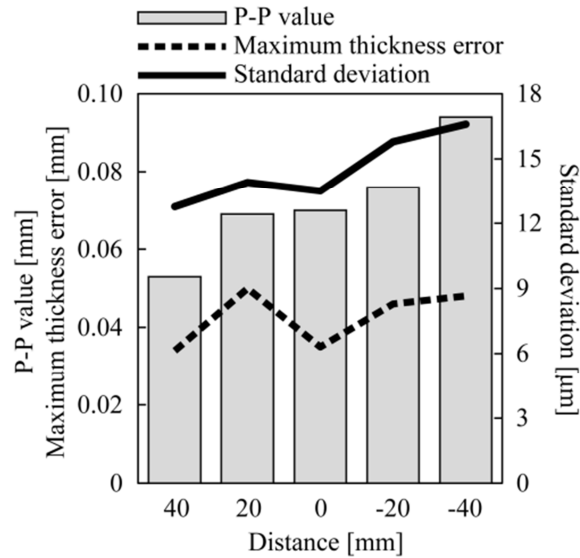


Fig. 4.14 P-P value and standard deviation of plate measurement

4.5.2 半円筒面

半円筒面の工作物に対する板厚測定精度検証を行った。測定対象物と測定範囲を図 4.15 に示す。測定対象物は円筒形状のため形状に異方性がある。そこで、図 4.16 に示すようにセンサと円筒軸方向の関係を変更し、センサ受光系と円筒軸方向が垂直な場合(図 4.16(a))と平行な場合(図 4.16(b))の測定精度に与える影響をそれぞれ検証、比較した。測定条件を表 4.3 に示す。また、形状、板厚測定の様子と測定経路を図 4.17 に示す。形状測定では、全測定対象点に対して同じ測定姿勢で測定を行う。一方、板厚測定では各測定対象点にて測定姿勢を変化させて測定を行うことが見てとれる。板厚分布図を図 4.18 に示す。測定範囲は、3 節の結果から形状測定での測定面に対するレーザ入射角度が 50° 以内になる範囲とし、平板の測定実験において $-20 \sim 20 \text{ mm}$ においてはほぼ測定距離の影響がなかったことから、形状測定は、測定対象物までの距離が $-20 \sim 20 \text{ mm}$ の範囲に収まるようにして行った。図 4.19 に測定結果の最大板厚誤差と P-P 値、標準偏差を示す。本実験において推定される板厚誤差 E_T は $E_T = 57.5 \mu\text{m}$ であるが、両条件において推定値と同程度での測定が可能であった。P-P 値、標準偏差については共に円筒軸方向が受光方向と平行な場合が大きくなる結果となった。これは本実験では旋削加工面を有する工作物を測定対象物としたため、円筒軸方向が受光方向と平行な場合、加工痕の影響により受光系の散乱方向にばらつきが生じやすくなったためと考えられる。

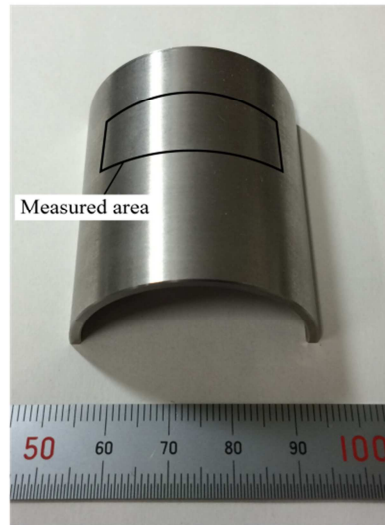


Fig. 4.15 Workpiece

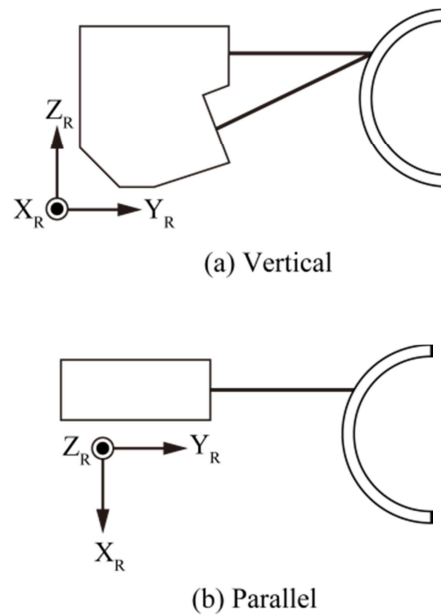


Fig. 4.16 Relationship between cylindrical axis and laser light receiving direction

Table 4.3 Experimental conditions

Workpiece	Thickness	1.961 mm
	Outer diameter	42 mm
	Surface	R_a 0.941 μm , Matte spray coating
Range		11 \times 29 mm
Interval		1 mm
Direction of cylindrical axis		Parallel / Vertical to the laser light receiving direction

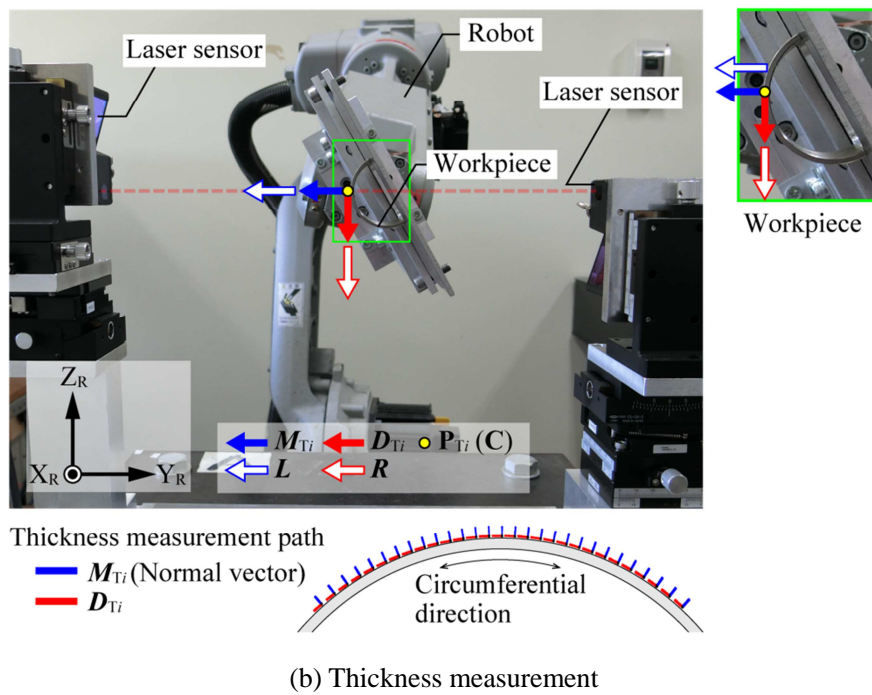
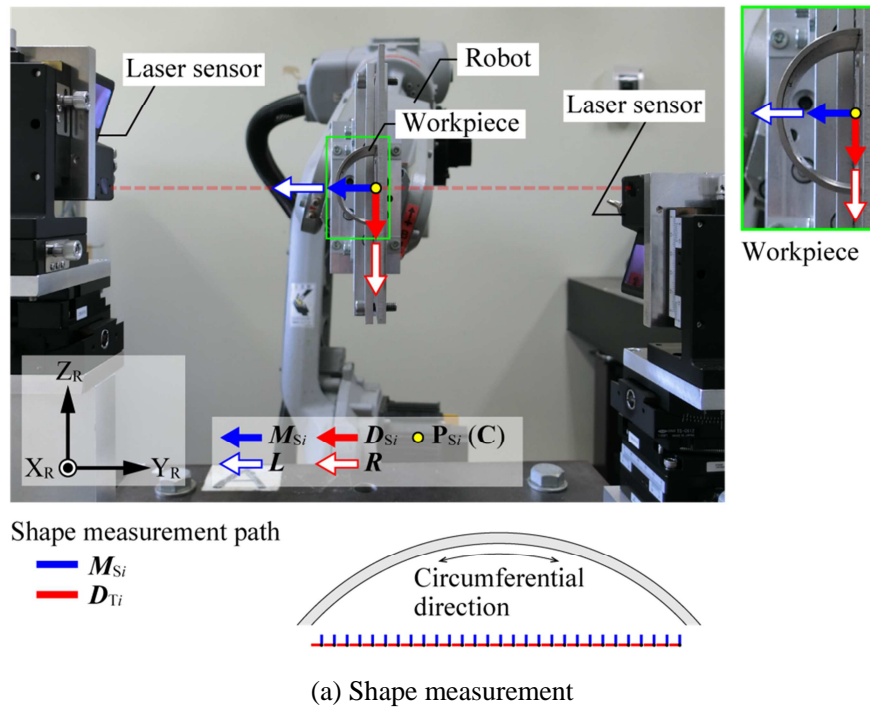


Fig. 4.17 Appearance of the measurement

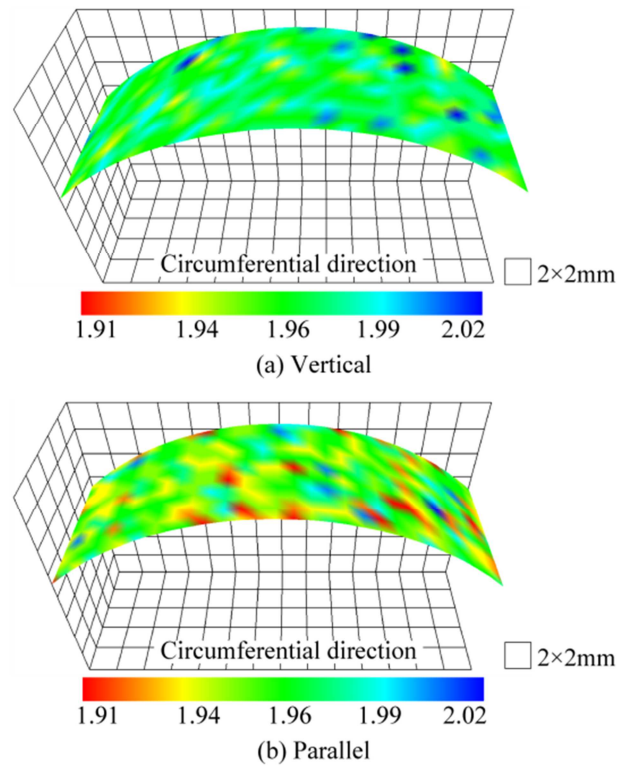


Fig. 4.18 Thickness distribution map of cylindrical workpiece

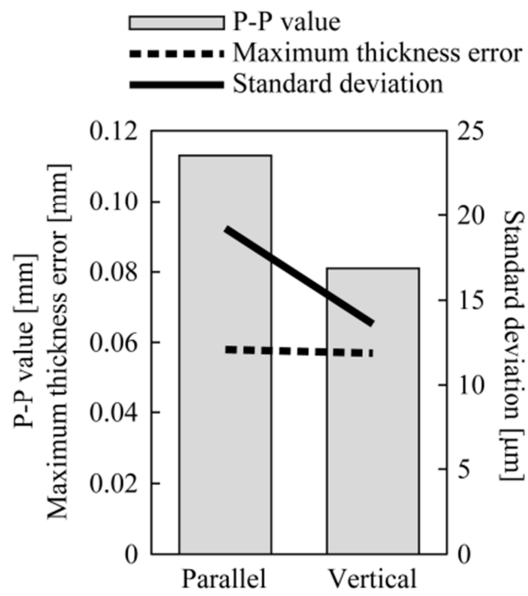


Fig. 4.19 P-P value and standard deviation of cylindrical workpiece

4.6 まとめ

本章では，システムの主な誤差要因について，センサ性能，又は実験から検討し，板厚測定誤差を推定した．また，基本形状に対する実験より推定した測定誤差の検証を行い，以下の結果を得た．

- (1) 測定位置決め精度は $54.9\mu\text{m}$ と推定され，本システムで用いた法線ベクトルの算出方法における必要精度を満たすことを確認した．
- (2) 板厚測定のための測定姿勢誤差について，形状測定誤差に起因する姿勢誤差が主要因であり，全体の 10~11% 程度がロボットの絶対位置決め誤差に起因する．
- (3) 形状測定誤差要因は，センサの平面スキニング精度，センサ直線性，ロボット直線性の順に大きい．
- (4) 本システムにおける板厚測定精度は板厚，測定間隔に応じて決定され，板厚が大きく，測定間隔が小さいほど測定誤差は大きくなる．
- (5) 平板，半円筒面に対して，推定した板厚測定誤差以内，又は同程度での測定が可能であることを確認した．

第 5 章 高傾斜面を持つ形状の測定

5.1 概要

本システムでは測定対象物に対して一定の姿勢で形状測定を行うが、4 章にて照射角度の影響調査を行った結果、 $\pm 50^\circ$ 以内では照射角度の変化による影響が見られなかったが、それ以上では測定誤差が増大したことから、測定可能な対象形状を 50° 以内の傾斜角度を持つ工作物とした。しかし、実際の工作物ではこれ以上の傾斜角度を含む場合も十分に想定されることから、 50° 以上の傾斜角度を持つ工作物についての形状測定方法を検討する必要があると考えられる。また、傾斜角度の増大につれて傾斜面では測定点間隔が広くなり十分な測定密度が得られないことが考えられる。一般的に薄板加工品の傾斜部分は板厚の減少率が大きく、特にその評価が必要な箇所だといえるため、高密度な測定データを取得することが望ましい。例として、図 5.1 に高傾斜面を持つハット型工作物の一部についての形状測定結果を示すが、傾斜面において平面部分と比較して明らかな測定密度の低下及び、測定対象物形状を大きく逸脱する測定誤差が発生していることが確認できる。過去の研究でも測定密度を考慮した形状測定が検討されていたが、傾斜角度の影響により発生する測定誤差については考慮されてこなかったため[1]、測定密度と測定精度の 2 つの問題を解決する形状測定方法が新たに必要である。

以上より、本章では高傾斜面に対して十分な測定密度を確保し、測定精度が保証された範囲内の傾斜角度と同等の測定精度を得ることのできる形状測定方法を提案する。なお、本研究では提案手法の基礎的な検討を行うことを目的として、測定範囲内にはひとつの凸形状のみが含まれ、円錐台や球形状のように底面、側面、上面を持つ工作物を測定対象とする。またすべての側面は 50° 以上の傾斜面であるとし、球形状については傾斜角度に応じて側面と上面を分離する。

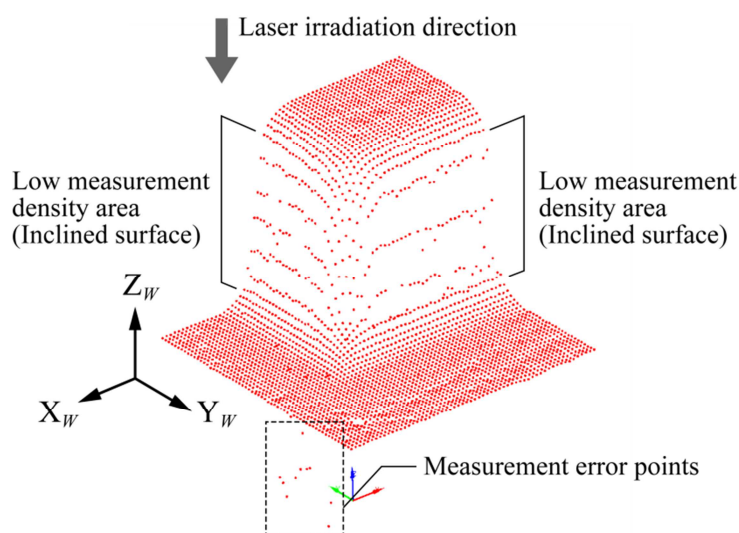


Fig. 5.1 Shape measurement result of the workpiece with high inclined surface

5.2 測定方法

提案する手法では、一方向からの形状測定により得られた初期形状データから有効値のみを抽出し、抽出した領域以外の領域に対して新たな測定姿勢を生成して追加形状測定を実施する。つまり、従来通り一方向からのみの形状測定と、姿勢を適切に変化させた形状測定の2段階の形状測定が実施されることとなる。測定手順を図 5.2 に示し、それぞれの手順内容について以下詳細に説明する。また、各処理内容については、側面箇所の把握が容易な円錐台形状をモデルに説明する。

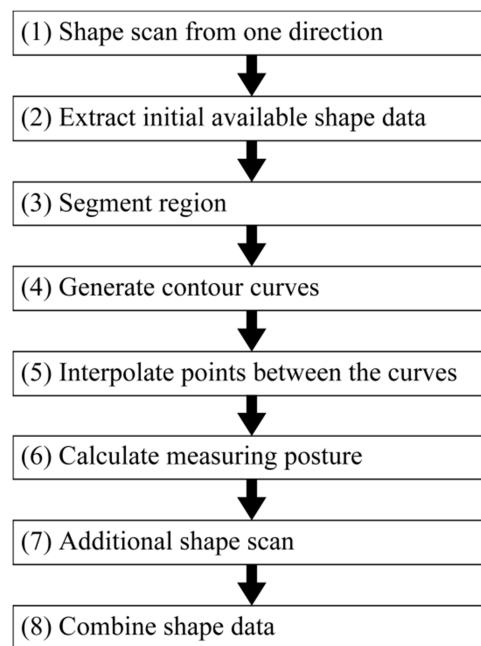


Fig. 5.2 Shape measurement procedure

(1) 一定の姿勢での形状測定

3.2 に示した通りに、測定物座標系の X_W - Y_W 平面に格子状に並んだ点群を測定点、 Z_W 方向を形状測定ベクトル \mathbf{M}_{Si} 、 X_W 方向を測定方向ベクトル \mathbf{D}_{Si} とする形状測定経路を生成して測定を行い、取得したデータを「初期形状データ」と定義する。図 5.3(a)に円錐台形状に対する初期形状データを示す。

(2) 初期有効形状データの抽出

初期形状データには、傾斜角度が大きい場合、測定値が取得できずに測定エラー値が含まれる場合があるが、このような場合は測定エラー値を事前に除去しておく。測定エラー値を除去した形状データを用いて各測定点に対する法線ベクトル \mathbf{N}_i を算出し、 \mathbf{N}_i とレーザ

照射方向である M_{Si} の 2 つのベクトルが成す角度を計算する。4.3(iii)より、2 つのベクトルが成す角度が 50° 以上の測定点は測定精度が保証されないとして、形状データから除去する。また、以上の処理により周辺点群から独立し、領域分割を困難にする点をなくすために、隣接点座標との距離が大きい点についても形状データから取り除く。以上のように測定精度の低いデータが除去された形状データを「初期有効形状データ」と定義する。図 5.3(a)に示す円錐台形状に対する初期有効形状データを図 5.3(b)に示すが、側面部分が除去され、有効領域は円錐台の上面と底面領域となる。

(3) 領域をセグメント化

領域成長法を用いて、初期有効形状データをセグメント化する[2]。初期有効形状データから任意にシード点を選択し、領域の成長条件を測定点間距離として、一定の距離内にある点を領域に加えていく。追加される点なくなるまでこの処理を繰り返して、1 つの領域とする。また上記の処理で領域に属さなかった点群についても任意にシード点を与え、同様の処理を繰り返す。以上より、本研究で対象とするような図 5.3(b)に示す円錐台形状では、2 つの領域が生成される。

(4) 各輪郭点群から輪郭曲線を生成

各領域の輪郭点群を抽出し、輪郭点群を補間する NURBS 曲線を生成し、各領域の輪郭曲線として定義する。輪郭点群を曲線にすることで、任意の間隔で追加形状測定点を生成することができる。NURBS 曲線の生成には、本研究室で開発中の OpenCAM カーネル Kodatuno を使用した[3]。初期形状データの輪郭については、追加形状測定経路の生成に不必要であるため、曲線の生成対象から除外する。図 5.3(b)に示すように輪郭曲線は点群を除去した領域を囲むように生成される。

(5) 輪郭曲線間に点群を補間

輪郭曲線で囲まれる領域に対して追加形状測定点を生成するために、各輪郭曲線上に必要な測定密度を考慮した等分割点を生成し、各等分割点を最短距離で結ぶ線分を生成する。これらの線分を追加形状測定経路要素 $PE_j (j=1 \sim N_{PE}, N_{PE}: \text{追加形状測定経路要素数})$ と定義し、 PE_j 上に必要な密度を考慮した等分割点を生成する。生成した点群を追加形状測定点 $P_{ASk} (k=1 \sim N_{AS}, N_{AS}: \text{追加形状測定点数})$ とする。図 5.3(c)に円錐台形状に対する追加形状測定経路要素と測定点を示す。

(6) 測定姿勢を算出

測定面に対して可能な限り垂直にレーザ照射することのできる形状測定姿勢を PE_j ごとに生成する。ここでは、 PE_j を 3 次元ベクトルとして取り扱う。 PE_j と Z_w 軸を通る平面を算出し、生成した平面と一致して PE_j に垂直なベクトルを測定ベクトル M_{ASj} とする。また測

定対象物とレーザ変位計の物理的な干渉が生じにくいようにロボットハンドの動作を減らすために M_{ASj} に垂直で X_W - Z_W 平面に一致するベクトルを測定方向ベクトル D_{ASj} とする. 以上より, $(P_{ASk}, M_{ASj}, D_{ASj})$ (k =追加形状測定点数, j =追加形状測定経路要素数)の組を追加形状測定経路とする. 図 5.4 に円錐台形状に対して生成した測定姿勢を示す.

(7) 追加形状測定

生成した追加形状測定経路に基づいて形状測定を行う.

(8) 形状データを結合

形状データは PE_j をゼロ値とした場合の高さ成分として取得されるため, 取得した形状データを測定物座標系に座標変換することで初期有効形状データに合成し, 最終形状データを取得. 最終形状データに対する法線ベクトルの生成には主成分分析を用いた.

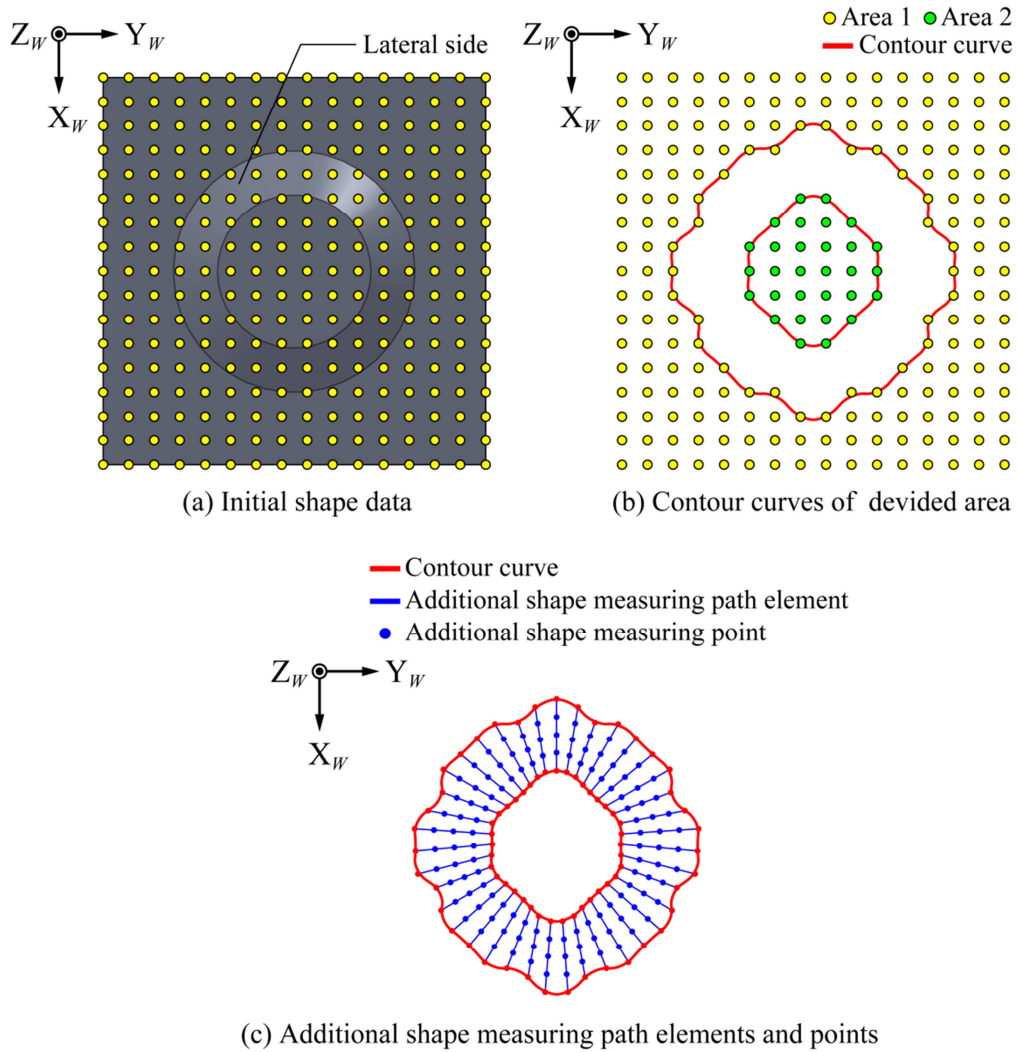


Fig. 5.3 Generation of additional shape measuring points

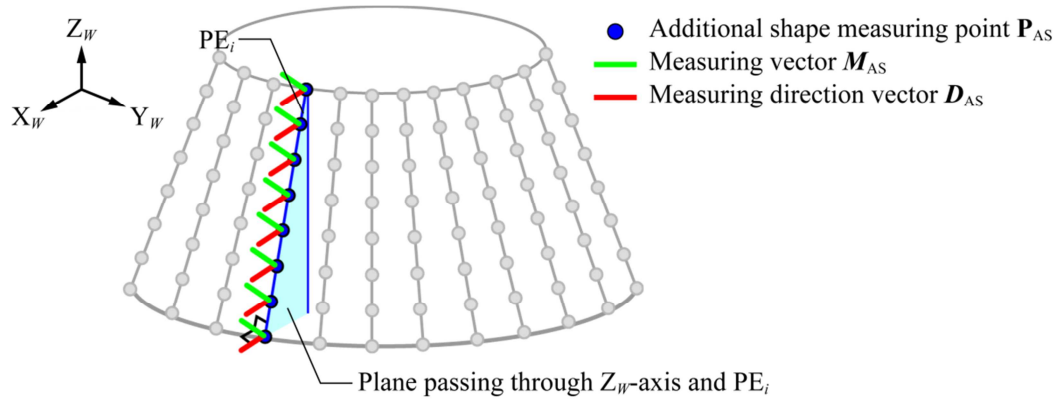


Fig. 5.4 Generation of additional shape measuring posture

5.3 測定実験

提案した形状測定手法の有効性を検証するために、図 5.5 に示す張出し成型された半球形状の工作物に対して測定実験を行った。半球形状のように法線方向が連続的に変化する工作物に対しても提案手法が有効かを確認する。実験条件を表 5.1 に示す。また、図 5.6 に初期形状データ、初期有効形状データ、最終形状データをそれぞれ示す。初期形状データにおいて測定間隔が広がっていた側面部分が初期有効形状データでは除去され、上面と底面の領域に分割された。側面部分に対しては図 5.7 に示す追加形状測定経路が生成され、追加形状測定が実行された。最終形状データでは、追加形状測定点と初期有効形状データが合成され、側面においても十分な測定密度を得ることができた。また、初期、追加形状測定においてレーザ照射軸と測定面の法線方向が成す角度を図 5.8 に示す。最大は初期形状測定では 67° 、追加形状測定では 35° となった。追加形状測定では 40° 以上となる測定姿勢が生成されず、すべての測定点で測定精度が保証される傾斜角度以内となった。最終形状データを用いた板厚測定結果を図 5.9 に示す。板厚減少率が大な側面部分のデータを高密度に取得できたことで、板厚分布を詳細に把握することができる。

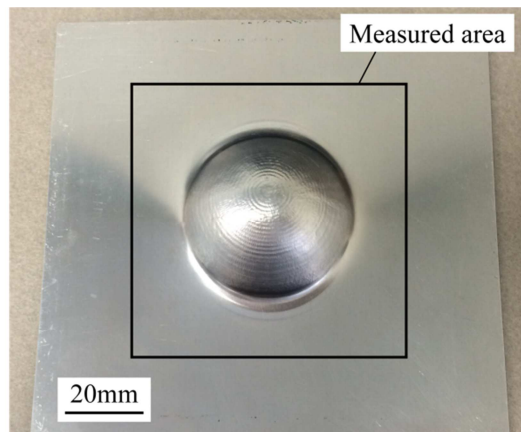
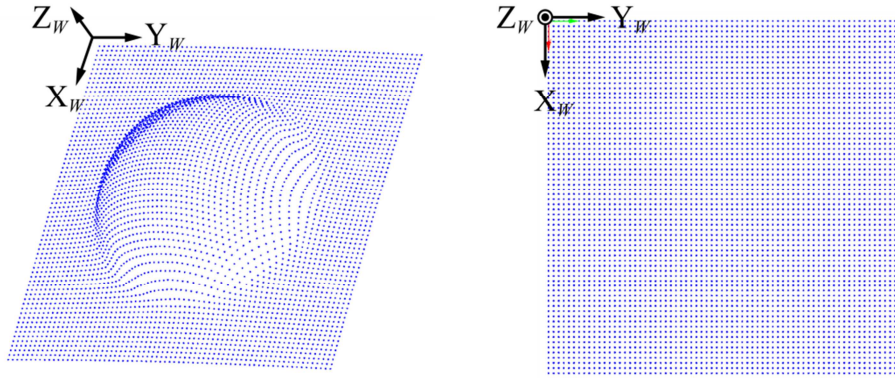


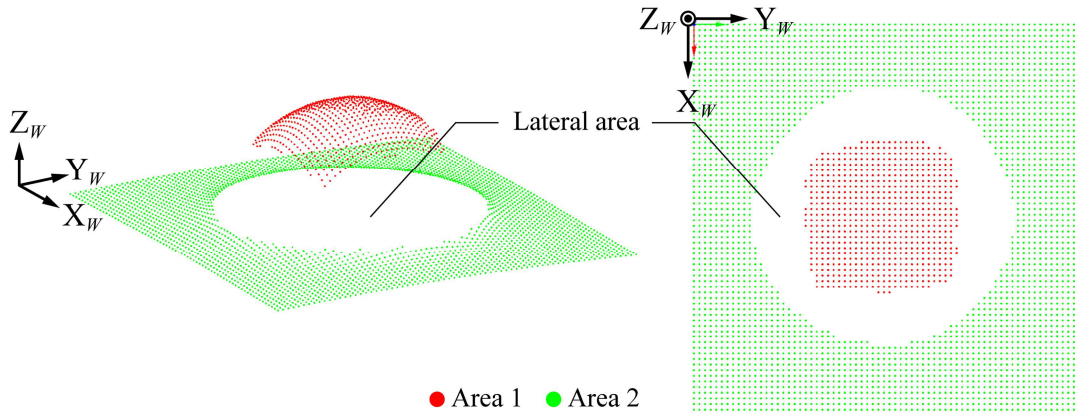
Fig. 5.5 Workpiece

Table 5.1 Experimental conditions

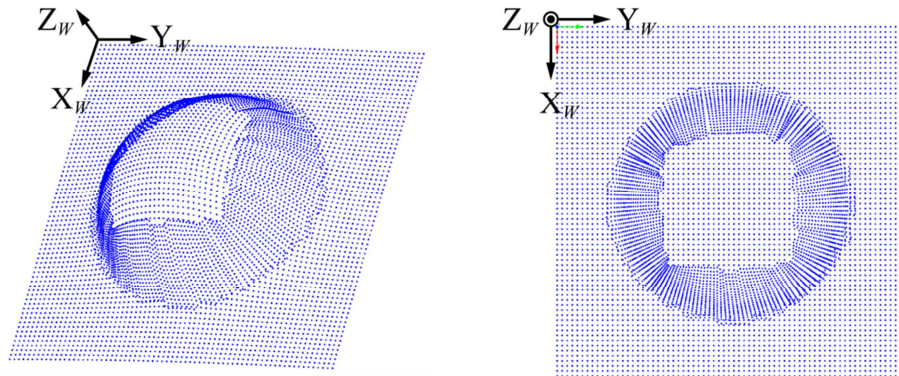
Size	120(L) \times 120(W) \times 20(H) mm
Initial thickness	0.5 mm
Measuring range	70 \times 70 mm
Shape measuring interval	1 mm
Shape	Hemisphere (50mm diameter)



(a) Initial shape data



(b) Initial available shape data



(c) Final shape data

Fig. 5.6 shape data

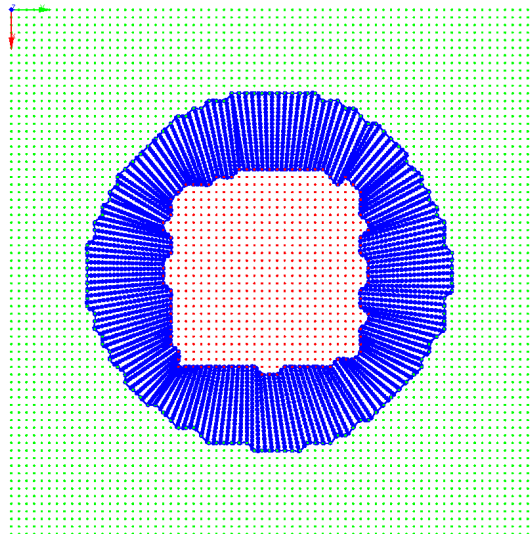


Fig. 5.7 Additional shape measurement path

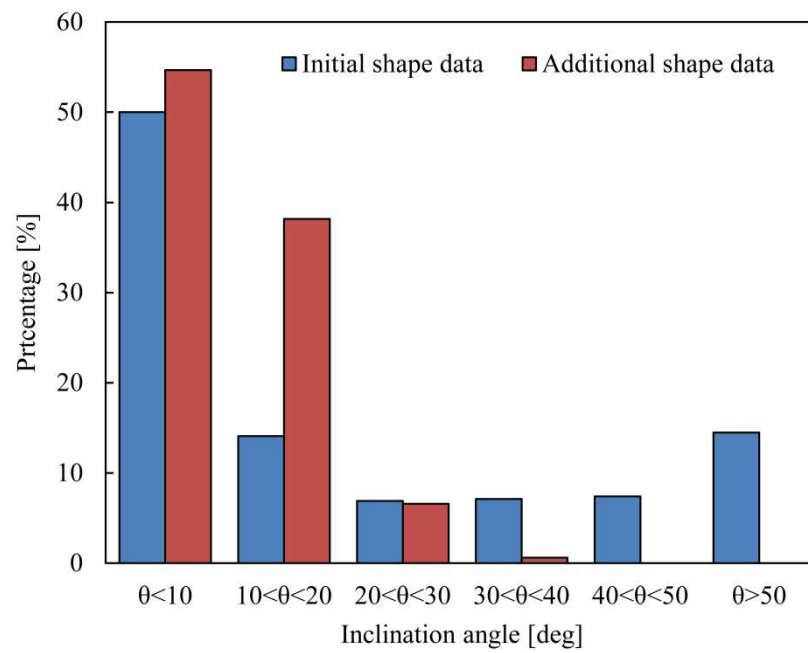


Fig. 5.8 Laser irradiation angle

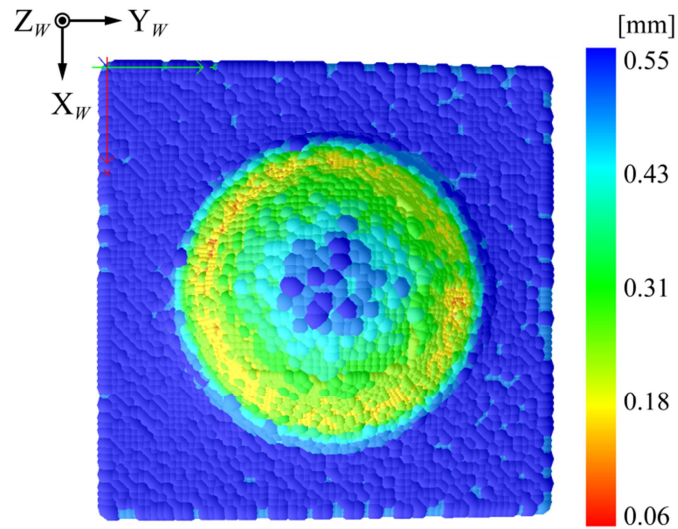


Fig. 5.9 Thickness distribution map

5.4 まとめ

本章では，提案する板厚測定システムを用いて，高傾斜面を持つ工作物の高密度，高精度な形状データを取得するための形状測定方法を提案し，半球形状に対して提案手法の評価実験を行った．本実験の範囲内において，以下の結果を得た．

- (1) 測定誤差が増大する 50° 以上の傾斜面を持つ箇所を判定し，判定箇所に対して測定間隔・入射角度を考慮した追加形状測定経路を生成した．
- (2) 半球形状に対する実験より，提案する形状測定手法では，基本手法を用いて生成した形状測定姿勢に対して，測定密度と入射角度が改善されたことを確認した．

参考文献

- [1] 池島紗知子，ロボットを用いた自由曲面板厚評価システムの開発（高アスペクト比形状への対応），金沢大学大学院修士論文，2010．
- [2] 藤井智，村上健治，黒木翔，中島大樹，増田宏，田中一郎，大規模点群データからの幾何曲面抽出，2008年度精密工学会秋季大会講演論文集，J06，2008．
- [3] K. Takasugi, T. Kumasaka, N. Asakawa, Development of Platform-Independent Open CAM Kernel, Proceedings of 6th LEM21, 2011．

第6章 干渉を考慮した測定経路生成

6.1 概要

本システムでは測定器として三角測量方式の拡散反射型レーザ変位計を使用する。この方式では、レーザ光を測定面に照射し、その反射光を受光することにより測定を行う。また板厚測定においては、板厚方向である測定面の法線方向にレーザ光を照射させて測定を行うが、図 6.1 に示すように凸部の先端付近などにおいては照射光あるいは反射光と測定物との干渉が発生して測定不可能な場合がある。4.3(iii)の照射光傾斜角度についての検証結果より、特定の範囲内であればレーザ照射光を傾斜させても測定に影響を与えないことから、本研究では測定姿勢を変化させることで干渉を回避した板厚測定を行う。干渉を考慮した板厚測定経路を生成するためには、5 軸制御加工における工具干渉問題への適用が報告されている[1]コンフィギュレーション空間（C-Space）を適用した方法を提案する。

測定表面の法線ベクトルをレーザ照射方向とする基本姿勢においては、測定姿勢は測定物形状に沿って変化するため、測定物形状に応じた連続性を持っているといえる。しかし、干渉のみを考慮して測定姿勢を変化させた場合、測定点間の連続性は保持されず、ロボットの移動量増加、急激な測定姿勢変化が発生する可能性がある。システムの実用性向上のためには、測定姿勢の連続性向上による測定時間の短縮、安定性向上が必要である。そこで、本章では測定姿勢の連続性を考慮した干渉回避経路の生成方法について提案する。提案手法では、3D アニメーション作成などのコンピュータグラフィックス分野で多用されるクォータニオンと呼ばれる回転表現と *squad* と呼ばれる回転補間を適用することで、連続性を考慮した測定経路を生成する。提案手法では、測定姿勢の連続性向上の有用性を検証することを目的として、基本手法により取得された格子状に整列した形状測定点を測定対象とする。

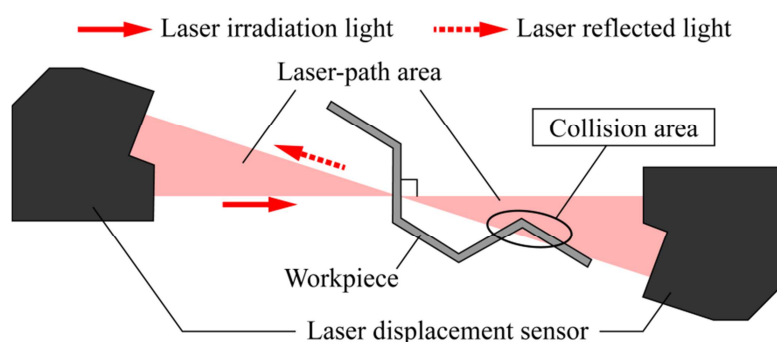


Fig. 6.1 Collision between laser light and workpiece

6.2 干渉検出

6.2.1 干渉検出対象のモデル化

6.1でも述べたとおり，三角測量方式のレーザ変位計は照射したレーザ光の反射光を受光することで測定を行うため，レーザの照射光と反射光で囲まれる三角形領域における測定物との干渉を検出する必要がある．本研究ではこのようなレーザの照射光と反射光で囲まれる領域を「レーザ光路領域」と定義する（図 6.1）．干渉検出のためには，レーザ光路領域と測定物のモデル化を行う．レーザ光路領域はレーザ変位計の仕様[2]から決定された対向する2つの三角形平面でモデル化される（図 6.2）．また測定物は，測定範囲（図 6.3（a））を形状測定して得られた点群の三次元位置座標（図 6.3（b））を通過する曲面（図 6.3（c））でモデル化される．モデル化には OpenCAM カーネル Kodatuno を使用し，それぞれのモデルは NURBS 曲面[3]で定義される．

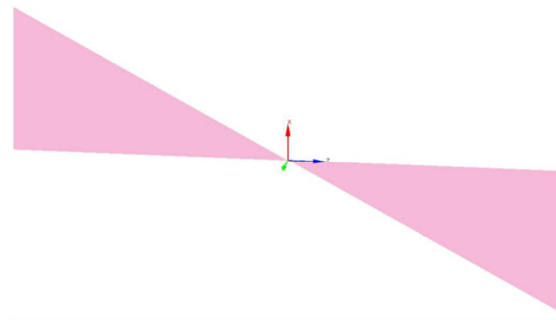
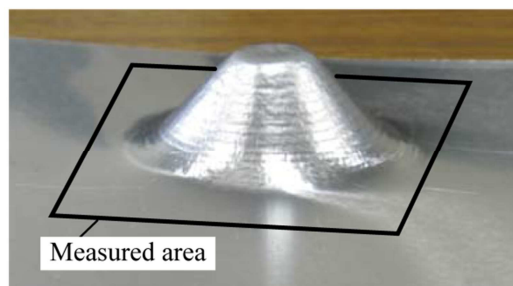


Fig. 6.2 Laser path area model



(a) Workpiece

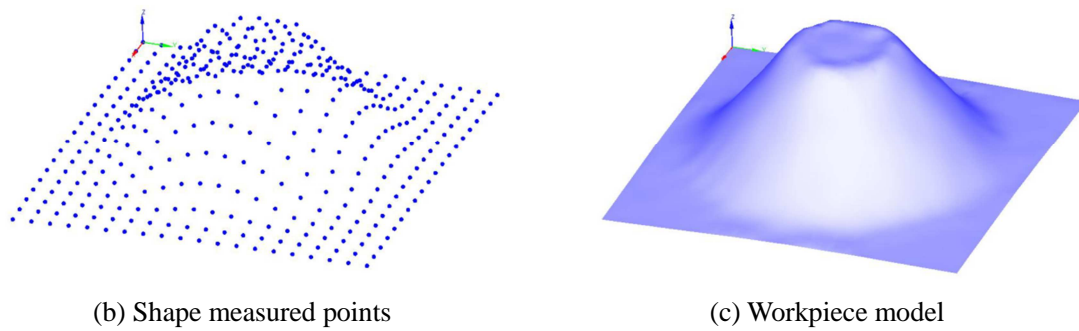


Fig. 6.3 Modeling of workpiece

6.2.2 干渉検出方法

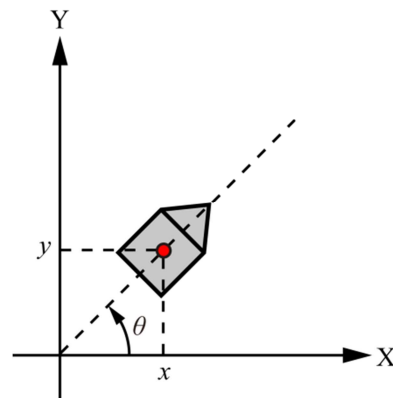
干渉検出のためには、実際の測定と同様に対象となる測定点において板厚測定ベクトル \mathbf{M}_{Ti} とレーザ照射ベクトル \mathbf{L} 、測定方向ベクトル \mathbf{D}_{Ti} と受光方向ベクトル \mathbf{R} が一致するようにモデル同士の位置関係を決定する。相対的な位置関係を決定したモデルに対する干渉検出の方法としては、2曲面間の交点の有無を計算する交点追跡法を用いることにより干渉を検出する[4]。2つの曲面を uv 方向にそれぞれ適当な分割数で分割してできた格子状の線が交わった点を使用してこれらの点同士のすべての組合せを調べ、交点が検出された時点で干渉と判断する。つまり、すべての組合せで交点が検出されない場合には、干渉なしと判断される。

6.3 C-Space を用いた測定可能領域の表現

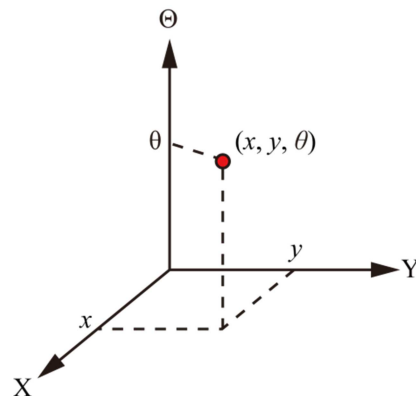
6.3.1 コンフィギュレーション空間

コンフィギュレーション空間（以後、C-Space）とは、ある物体が取り得るすべての位置・姿勢を表す、すべてのパラメータの組が構成する空間のことをいう。C-Space 上では、実空間上のある特定の位置・姿勢（つまり、コンフィギュレーション）をとる物体を 1 つの点で表現することが可能である[5]。例として、図 6.4(a)に示す 2 次元平面内の剛体は、位置を表す XY 、姿勢を表す θ の 3 つのパラメータでそのコンフィギュレーションが表現されるため、C-Space は図 6.4(b)に示すように 3 次元空間となる。つまり、C-Space の次元は、ある物体のコンフィギュレーションを特定するパラメータの個数と等しくなるが、本システムにおいては、各測定点の位置座標は不変であり、姿勢のみ変化するため、C-Space は 3 自由度の回転を表す 3 次元空間として、測定点ごとに作成する。C-Space を作成する座標系は、姿勢の連続性を考慮するために全測定点において同一とし、図 6.5 に示すように測定対象物の鉛直方向を X_A 方向、平面方向を Y_A - Z_A 平面として設定した座標系 $\{A\}$ の各軸回りの回転角度 $\gamma_A, \beta_A, \alpha_A$ をパラメータとする C-Space を作成する。干渉検出に要する計算時間を考慮し

て, 図 6.6 に示すように **C-Space** を作成する範囲は各パラメータ $\pm 20^\circ$ とし, 姿勢の生成は 5° 間隔とする. この **C-Space** 上に測定可能な姿勢のみを表現することにより, 適切な測定姿勢の選択を可能にする. 本研究では **C-Space** の有効範囲内の姿勢に対して, 正反射, レーザ受光量の不足, 測定物とレーザとの干渉が発生する姿勢を測定不可能な姿勢とし, これらの姿勢に対応する **C-Space** 上の領域を「誤差領域」として定義する. **C-Space** 上から誤差領域を除外することで, 測定可能な姿勢領域を生成することができ, この領域を「測定可能領域」と定義する. 図 6.7 に 1 つの姿勢を 1 つのブロックで表した場合の **C-Space** 上への測定可能領域のマッピング例を示すが, **C-Space** 上に発生原因が異なる誤差領域をまとめて表現することで, 各誤差要因を統一して扱うことが可能となる. それぞれの姿勢の **C-Space** 上の領域を, 正反射領域, 受光量不足領域, 干渉領域と定義し, 6.3.2~6.3.4 では上記の領域についてそれぞれ詳しく述べる.



(a) Object in 2-dimensional plane



(b) Object in configuration space

Fig. 6.4 Relationship between an object in 2-dimensional plane and configuration space

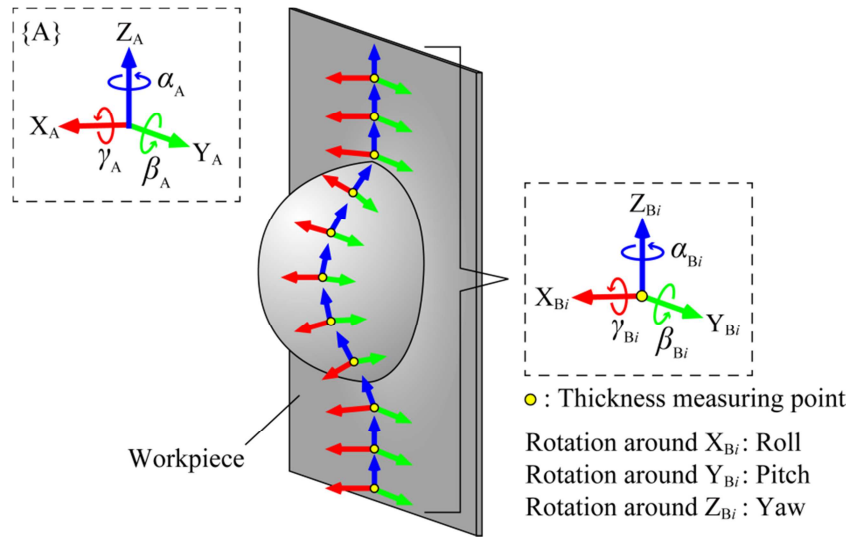


Fig. 6.5 Parameters to construct a C-Space

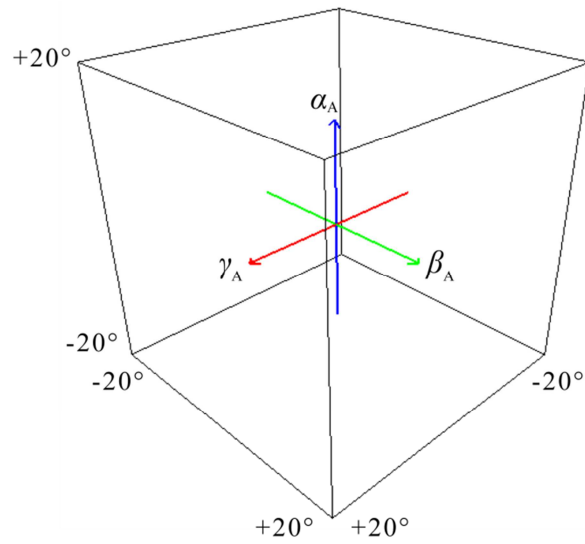


Fig. 6.6 3-dimensional C-Space

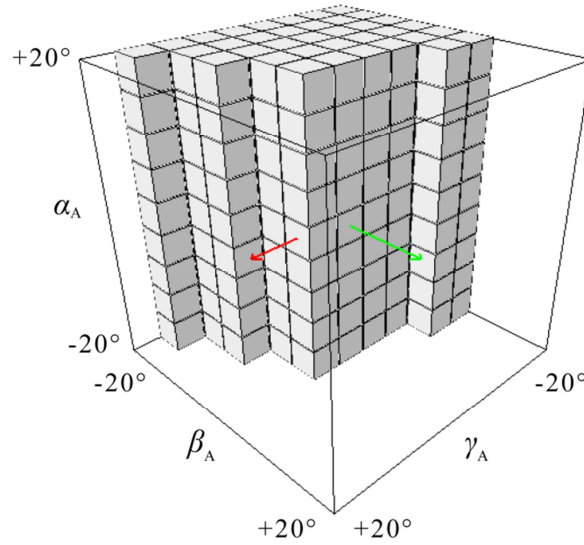


Fig. 6.7 Measurable postures on C-Space

6.3.2 正反射領域

図 6.5 に示すように，基本姿勢の板厚測定ベクトルを X_{Bi} 軸，測定方向ベクトルのマイナス方向を Z_{Bi} 軸とする座標系 $\{B_i\}$ を各測定点において定義し，各軸回りの回転をロール，ピッチ，ヨー，回転角度を γ_{Bi} ， β_{Bi} ， α_{Bi} とする．4.3(iii)において正反射が生じた受光系方向への回転はピッチに相当し，座標系 $\{B_i\}$ の定義とセンサの配置からピッチでの $\beta_{Bi} = -10^\circ \sim -6^\circ$ の範囲が誤差増大領域となり，この姿勢領域を「正反射領域」と定義する．正反射領域は座標系 $\{B_i\}$ に基づいて定義されるため，C-Space 上に表現するためには $\{B_i\}$ ごとに座標変換を行い，座標系 $\{A\}$ における角度に変換する．

6.3.3 受光量不足領域

6.3.2 と同様に 4.3(iii)で示した受光系方向への回転はピッチ，変位計幅方向への回転はヨーに相当し，これらの回転では受光量が不足することにより $\pm 50^\circ$ 以上で測定誤差が増大する．つまり， α_{Bi} ， $\beta_{Bi} \geq 50^\circ$ あるいは α_{Bi} ， $\beta_{Bi} \leq -50^\circ$ となる姿勢において誤差が増大し，このような姿勢領域を「受光量不足領域」と定義する．ロールについては，レーザ光軸回りの回転となるため，原理的には 360° 測定可能であるが，測定物と測定ユニットとの物理的な干渉やロボットの可動範囲を考慮してピッチ，ヨーと同様に最大 $\pm 50^\circ$ まで傾斜可能とした．また正反射領域と同様に，受光量不足領域は座標系 $\{B_i\}$ に基づいて定義されるため，座標系 $\{A\}$ への座標変換を行い，C-Space にマッピングされる．

6.3.4 干渉領域

正反射領域, 受光量不足領域を除く **C-Space** 上の生成範囲の姿勢に対して干渉検出を行い, 干渉検出された姿勢の集合を「干渉領域」と定義する. 干渉検出を実行する測定姿勢は, X_A 方向に板厚測定ベクトル \mathbf{M}_{Ti} , $-Z_A$ 方向に測定方向ベクトル \mathbf{D}_{Ti} を一致させた状態を $\gamma_A=\beta_A=\alpha_A=0^\circ$ として, 各回転を加えた測定姿勢に対して干渉検出を行う.

6.4 連続性を考慮した干渉回避経路生成

6.4.1 測定姿勢の連続性

本研究では姿勢の連続性を考慮した測定経路を生成するが, 姿勢の連続性を考慮した移動経路が必要とされるその他の分野として, 5 軸制御加工や産業用ロボットを用いた加工のための工具経路生成, 3D アニメーション分野における物体のモーション生成が挙げられる. 例として, 5 軸制御加工のための工具経路生成手法として, 森重らにより, 工具姿勢を表す 2 つのパラメータと工具移動を表す 1 つのパラメータから構成される 3 次元 **C-Space** を用いて連続的な工具経路を生成する手法が報告されている[1]. この手法は工具姿勢が 2 つのパラメータで表現される 5 軸加工を対象としているため, 姿勢表現に 3 つのパラメータを必要とする本システムに対しては適用が難しい. 一方, 3D アニメーション分野では一般的に 3 自由度を持つ物体の滑らかなモーションが求められ, 滑らかなモーション作成にはクォータニオンと呼ばれる姿勢表現が多用される. その理由として, クォータニオンは姿勢補間機能に優れており, 最短での滑らかな姿勢補間が可能であることが挙げられるため, 本研究では, クォータニオンの補間機能を用いて連続性を考慮した測定経路を生成する.

本手法では, 各測定点における測定可能領域を比較することで, 測定経路要素における補間のための代表点とそこでの姿勢を決定し, **squad** と呼ばれるクォータニオンの補間機能を用いて代表点間の姿勢を決定する.

6.4.2 測定経路生成手順

図 6.8 に測定姿勢の連続性を考慮した測定手順を示す. (1)形状測定, (2)法線ベクトル算出, (8)板厚測定については, 3 章で述べた測定方法に基づいて行い, 本手法においては 5 章で示した追加形状測定が行われていない格子状に並んだ形状データを測定対象とする. 本システムでは, 格子状に並んだ形状データに対しては, 図 6.9 のように一定の走査方向に板厚測定を行うが, 測定列一列を「測定経路要素」と定義し, 各測定経路要素内でのみ連続性を考慮するものとする. また, (3)基本姿勢での干渉検出は全測定点に対して行い, 干渉が検出された測定点を含む測定経路要素内でのみ姿勢の連続性を考慮した測定経路を生成することとする. 干渉が検出されなかった測定経路要素に対しては基本姿勢での測定経路を生成する.

本節では，クォータニオンとその補間機能である **squad** の性質，(5)補間のための代表点と初期姿勢の決定以降の各手順について詳細に述べる．

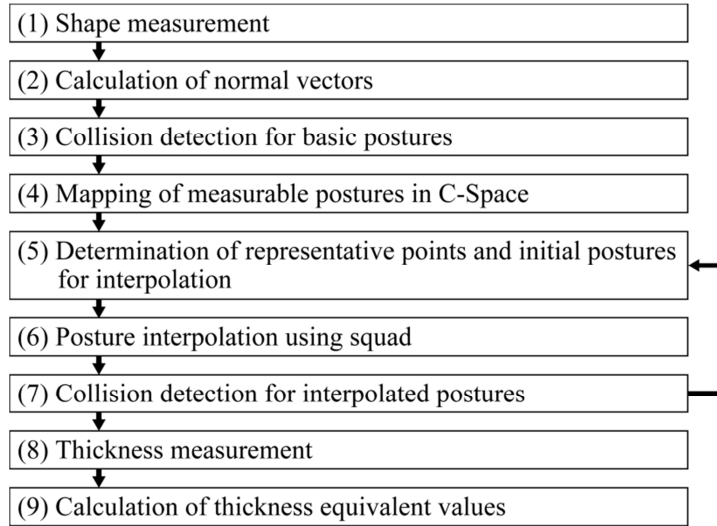


Fig.6.8 Measurement procedure considering the continuity of the postures

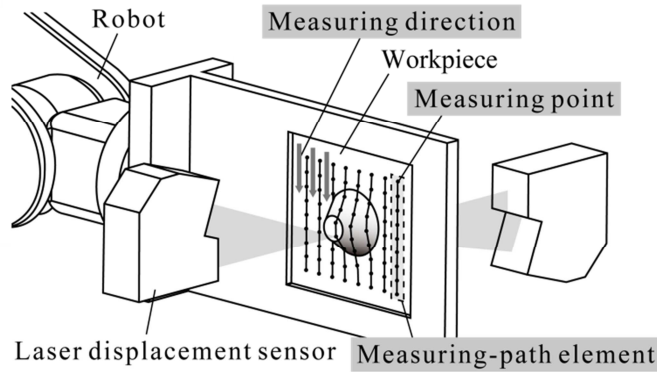


Fig. 6.9 Measuring path element

6.4.3 クォータニオン

クォータニオンとは回転表現のひとつである．四元数とも呼ばれ，図 6.10 のような 3 次元空間上における任意の軸回りの任意の回転を記述することができる[6]．クォータニオンの形式は，1 つのスカラー要素と 3 つのベクトル要素で構成され，式(6.1)あるいは式(6.2)のように表され，3 次元座標 $\mathbf{P}(x_p, y_p, z_p)$ は式(6.3)，3 次元ベクトル $\mathbf{A}(a_p, a_p, a_p)$ は式(6.4)のように表される．また，回転軸 $\mathbf{K}(k_x, k_y, k_z)$ 回りに θ だけ回る回転を表すクォータニオン Q は式(6.5)のようになる． \mathbf{P} の回転後の 3 次元座標 $\mathbf{R}(x_R, y_R, z_R)$ は，式(6.3)，(6.5)を用いて式(6.6)により

算出される. Q^* は Q の共役クォータニオンと呼ばれ, 式(6.7)或いは式(6.8)のように表され, クォータニオンの乗算は式(6.9)或いは式(6.10)のようにして計算される. この回転はベクトルについても同様に行うことが可能である.

$$q = [w, x, y, z] \quad (6.1)$$

$$q = [w, \mathbf{v}] \quad (\mathbf{v} = [x, y, z]) \quad (6.2)$$

$$\mathbf{P} = (0, x_p, y_p, z_p) \quad (6.3)$$

$$\mathbf{A} = (0, a_x, a_y, a_z) \quad (6.4)$$

$$Q = (\cos \frac{\theta}{2}, k_x \sin \frac{\theta}{2}, k_y \sin \frac{\theta}{2}, k_z \sin \frac{\theta}{2}) \quad (6.5)$$

$$Q^* P Q = (0, x_R, y_R, z_R) \quad (6.6)$$

$$q^* = [w, -x, -y, -z] \quad (6.7)$$

$$q^* = [w, -\mathbf{v}] \quad (6.8)$$

$$\begin{aligned} q_0 q_1 &= [w_0, x_0, y_0, z_0] [w_1, x_1, y_1, z_1] \\ &= \begin{bmatrix} w_0 w_1 - x_0 x_1 - y_0 y_1 - z_0 z_1 \\ w_0 x_1 + x_0 w_1 + y_0 z_1 - z_0 y_1 \\ w_0 y_1 + y_0 w_1 + z_0 x_1 - x_0 z_1 \\ w_0 z_1 + z_0 w_1 + x_0 y_1 - y_0 x_1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6.9)$$

$$\begin{aligned} q_0 q_1 &= [w_0, \mathbf{v}_0] [w_1, \mathbf{v}_1] \\ &= [w_0 w_1 - \mathbf{v}_0 \bullet \mathbf{v}_1, w_0 \mathbf{v}_1 + w_1 \mathbf{v}_0 + \mathbf{v}_0 \times \mathbf{v}_1] \end{aligned} \quad (6.10)$$

クォータニオンによる姿勢補間では, 2 つ或いはそれ以上の姿勢の最短での補間が簡単に行える. q_0, q_1 をクォータニオンとすると, q_0 と q_1 の間を補間する一般公式は式(6.11)のように与えられる. ここで, $f_0(t)$ と $f_1(t)$ は式(6.12)を満たすスカラー関数である.

$$q(t) = f_0(t) q_0 + f_1(t) q_1 \quad (0 \leq t \leq 1) \quad (6.11)$$

$$\begin{aligned} f_0(0) &= 1, f_0(1) = 0 \\ f_1(0) &= 0, f_1(1) = 1 \end{aligned} \quad (6.12)$$

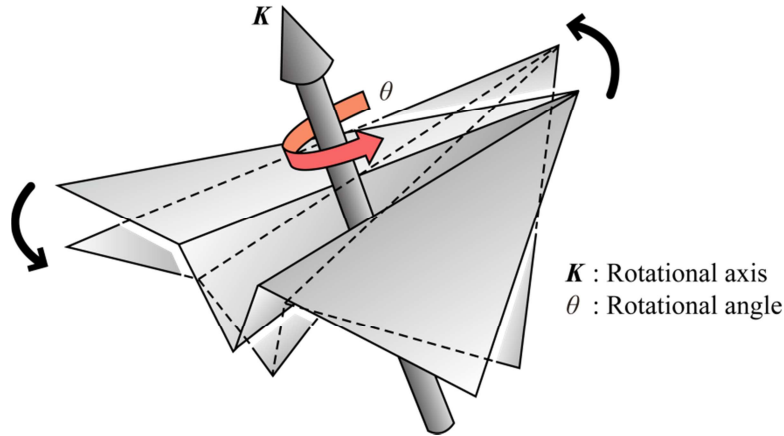


Fig. 6.10 Rotation around arbitrary axis in 3-dimensional space

6.4.4 球面三次補間 (**squad**)

パスを定義する一連の 3 つ以上のクォータニオン列間を滑らかに補間するためには、図 6.11 のようなスプラインを用いるべきであり、スプライン補間の基礎となるのが、**squad** (球面三次補間: spherical and quadrangle interpolation) である[6]. ここで、制御点が以下の一連のクォータニオンによって定義されたとする.

$$q_1, q_2, q_3, \dots, q_{n-2}, q_{n-1}, q_n$$

また補助クォータニオンと呼ばれるクォータニオン a_i も式(6.13)のように定義する.

$$a_i = q_i \exp\left[-\frac{\log(q_i^{-1}q_{i-1}) + \log(q_i^{-1}q_{i+1})}{4}\right] \quad (6.13)$$

a_i は q_{i-1} , q_i , q_{i+1} を用いて計算されるため、 a_1 と a_n は定義されない. 言い換えれば、曲線は q_2 から q_{n-1} の範囲に引かれるということであり、最初と最後の制御点は、曲線の内側を指定するためだけに使用される. 曲線がこのような端点となる制御点を通過するためには、最初と最後にダミーの制御点を追加する必要がある、ダミーの制御点は端の制御点を複写することで生成する. q_i , q_{i+1} 間を補間する **squad** は式(6.14)で与えられる.

$$\mathbf{squad}(t; q_i, q_{i+1}, a_i, a_{i+1}) = \mathbf{slerp}(2t(1-t); \mathbf{slerp}(t; q_i, q_{i+1}), \mathbf{slerp}(t; a_i, a_{i+1})) \quad (6.14)$$

t は補間の割合を決定するパラメータであり、 $t=0\sim 1$ となる. **squad** は q_{i-1} , q_i , q_{i+1} , q_{i+2} の 4 つの制御点の情報を必要とし、**squad** を用いてベクトルを補間した例を図 6.12 に示す. また、**slerp** は 2 つのクォータニオン間を滑らかに補間することができる演算であり、以下の式で与えられる.

$$\text{slerp}(t; q_0, q_1) = \frac{q_0 \sin(\theta(1-t)) + q_1 \sin(t\theta)}{\sin \theta} \quad (6.15)$$

ここで、 θ は図 6.13 に示すように q_0 と q_1 の成す角度である． θ は q_0 と q_1 を四次元ベクトルとして扱い、それらの内積を用いて以下のように得られる．

$$\theta = \cos^{-1}(q_0 \bullet q_1) = \cos^{-1}(x_0 x_1 + y_0 y_1 + z_0 z_1 + w_0 w_1) \quad (6.16)$$

slerp による補間は、補間される 2 つの姿勢が非常に近い姿勢の場合、つまり $|q_0 \bullet q_1|$ が 1 に近づくと、線形補間に帰着する．

本研究においては、クォータニオン q を構成する 4 変数中の w に 0、 \mathbf{v} に測定ベクトル、或いは測定方向ベクトル要素を代入して使用する．

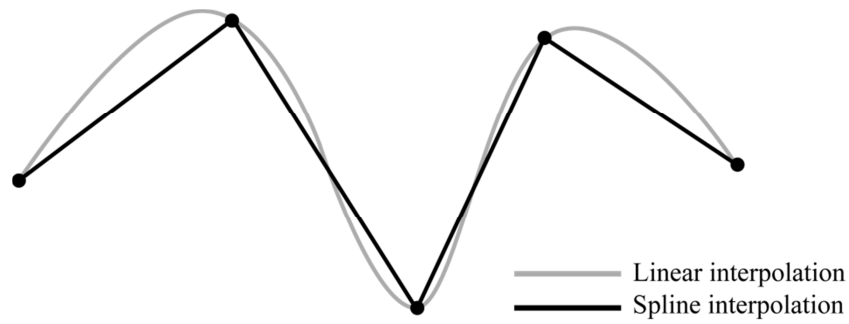


Fig. 6.11 Linear and spline interpolation

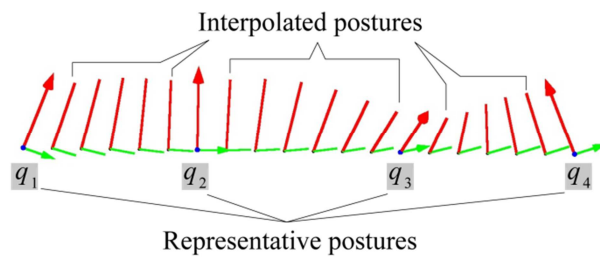


Fig. 6.12 Example of interpolation using **squad**

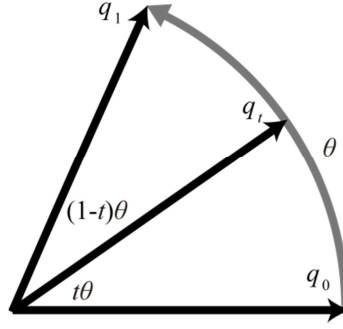


Fig. 6.13 Rotational interpolation using slerp

6.4.5 代表点の選定

squad を用いて測定経路を生成するためには、補間のための代表点と代表点における測定姿勢を決定する必要がある。代表点は測定経路要素を構成する測定点群の中から選定し、代表点における測定姿勢を「初期姿勢」と定義する。代表点の位置、個数、初期姿勢は連続性を決定する重要な要素となるが、本手法では、補間された測定姿勢が測定可能領域外となる可能性があり、その場合は、すべての姿勢が測定可能領域に収まるまで代表点を追加する。しかし、代表点が増えるほど姿勢の連続性は失われるため、代表点の個数はなるべく少なくしたい。そこで本研究では、C-Space 上の測定可能領域重心座標の変化量を利用することで代表点を選定し、代表点の追加生成が発生しにくい測定経路を生成する。

代表点の決定手順を以下に示す。なお、図 6.14 に示すような測定経路要素の端点である始点、終点は必ず代表点となる。

(1) 測定経路要素内の各測定点 $\mathbf{P}_i (i=1,2,\dots,n)$ において、式(6.17)より C-Space 上にマッピングされた測定可能領域の重心座標 $\mathbf{G}_i (x_{Gi}, y_{Gi}, z_{Gi})$ を求める (図 6.15)。 $m_j (j=1,2,\dots,M)$ は測定可能領域に含まれる各姿勢の座標値を示し、 M は含まれる姿勢の数を示す。

$$\mathbf{G}_i (x_{Gi}, y_{Gi}, z_{Gi}) = \frac{\sum_{j=1}^{j=M} m_j (x_j, y_j, z_j)}{M} \quad (6.17)$$

測定可能領域が 1 つの閉領域でなく複数に分かれているために、 \mathbf{G}_i が測定可能領域外となる場合は、 \mathbf{G}_i から最短にある測定可能領域内の姿勢を算出し、 \mathbf{G}_i として定義する。

(2) 図 6.16 に示すような $\mathbf{G}_i, \mathbf{G}_{i+1}$ 間の距離 $\mathbf{G}_i \mathbf{G}_{i+1}$ を式(6.18)より求め、測定経路要素内において $\mathbf{G}_i \mathbf{G}_{i+1}$ が極大値となる点 \mathbf{P}_i を求める (図 6.17)。

$$\mathbf{G}_i \mathbf{G}_{i+1} = \sqrt{(x_{Gi+1} - x_{Gi})^2 + (y_{Gi+1} - y_{Gi})^2 + (z_{Gi+1} - z_{Gi})^2} \quad (6.18)$$

(3) 極大値をとる測定点 P_i と、隣り合う 2 点 P_{i-1} , P_{i+1} の 3 つの C-Space 上にマッピングされた測定可能領域を比較し、共通領域を求める。

(4-a) 共通領域を持つ場合、極大値をとる点を代表点とする。

(4-b) 共通領域を持たない場合、極大値をとる点の両側の点を代表点とする。

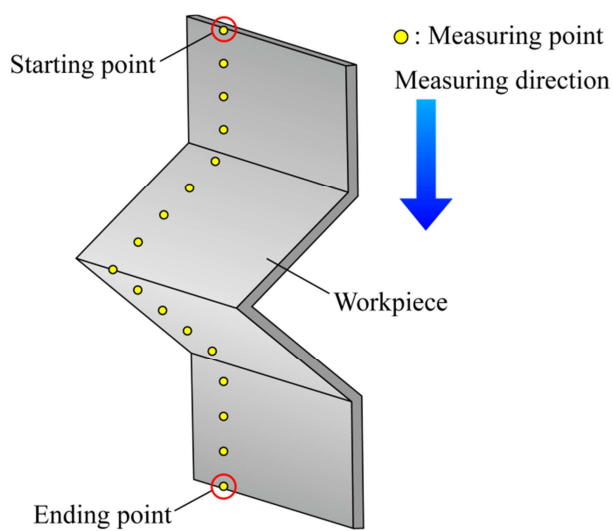


Fig. 6.14 Starting and ending point of measuring path element

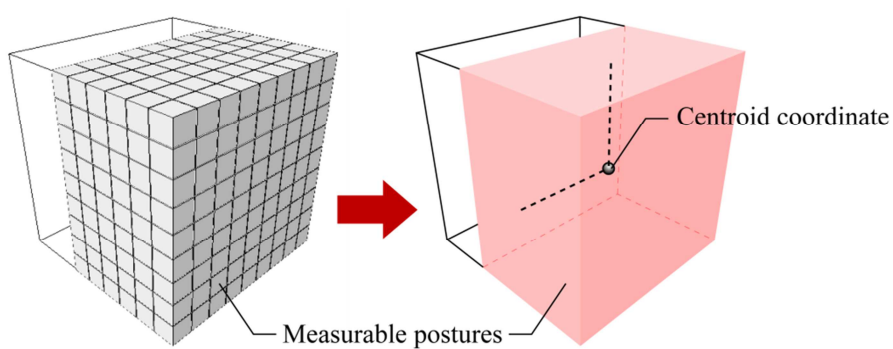


Fig. 6.15 Centroid of measurable postures

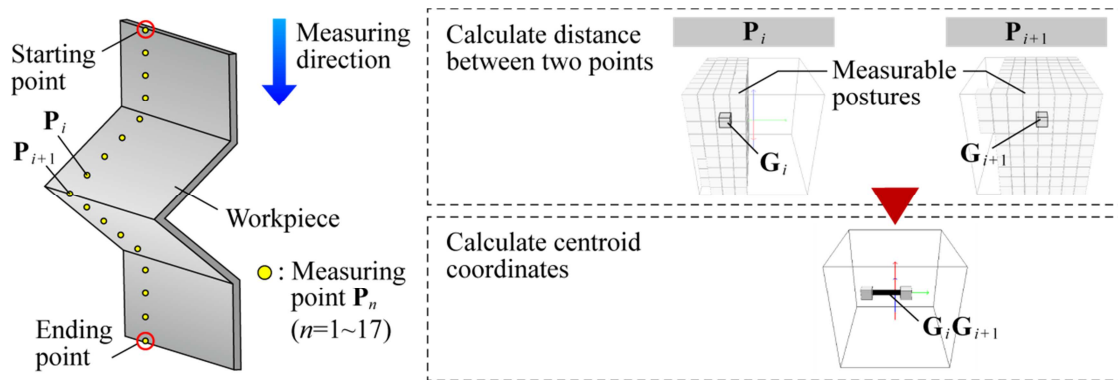


Fig. 6.16 Distance between two centroid coordinates

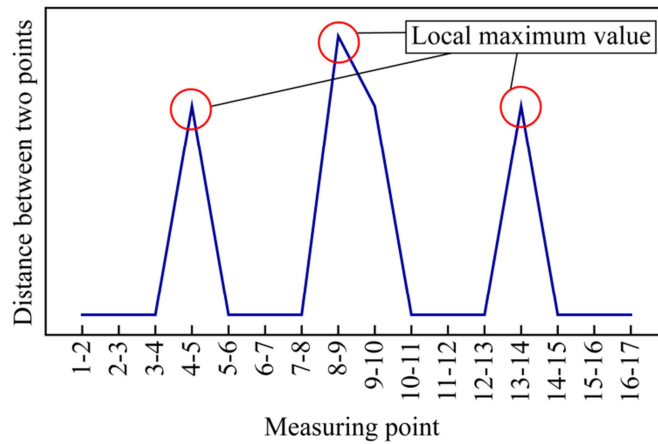


Fig. 6.17 Local maximum value of distance between two centroid coordinates

6.4.6 初期姿勢の決定

6.4.5 で 2 通りの方法で決定された代表点に対して、以下の方法でそれぞれ初期姿勢を決定する。

(a)代表点とその前後の測定点が共通領域を持つ場合

P_i において、図 6.18(a)のように共通領域の重心座標を初期姿勢とする。

(b)代表点とその前後の測定点が共通領域を持たない場合

P_{i-1} , P_{i+1} において、図 6.18(b)のように測定可能領域内の C-Space 上の原点から最短距離にある姿勢を初期姿勢とする。

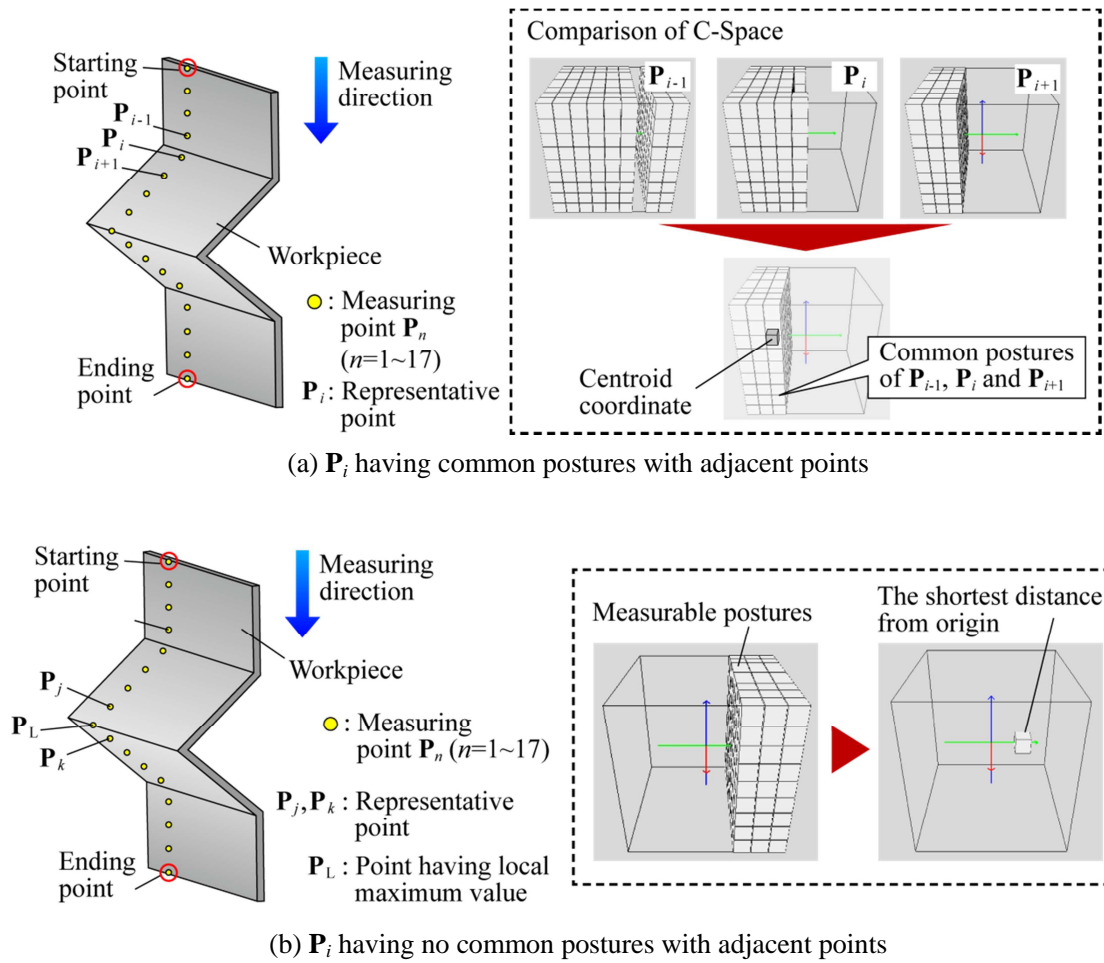


Fig. 6.18 Determination method of initial posture

6.4.7 補間後の測定姿勢検証

squad による姿勢補間後の測定姿勢に対して、測定経路要素内のすべての測定姿勢が測定可能領域内に収まっているかを調べる。測定不可能な姿勢を含む場合は、測定可能領域外の測定姿勢を持つ測定点を新たな代表点として補間を再度実行する。このとき、初期姿勢は元の姿勢から C-Space 上で最短距離にある測定可能領域内の姿勢とする。この処理はすべての姿勢が測定可能領域に収まるまで繰り返す。

6.4.8 板厚相当値の算出

基本姿勢での板厚測定においては、測定値が板厚に該当するが、測定姿勢を変化させた場合には、測定値 T から板厚相当値 A を算出する必要がある。 A は各測定点において、 $\{B_i\}$ からの回転角度を用いて算出される。各回転について、図 6.19(a)のようにローラーは測定面に対して照射角度が変化しないため、測定値が板厚となる(式(6.19))。ピッチ、ヨーについ

では図 6.19(b), (c)に示すように測定面に対して照射角度が変化するため, 板厚相当値は式 (6.20), (6.21)で算出される. すべての回転を考慮すると板厚相当値は式(6.22)で求められる.

$$A = T \quad (6.19)$$

$$A = T \times \cos \beta_B \quad (6.20)$$

$$A = T \times \cos \alpha_B \quad (6.21)$$

$$A = T \times \cos \beta_B \times \cos \alpha_B \quad (6.22)$$

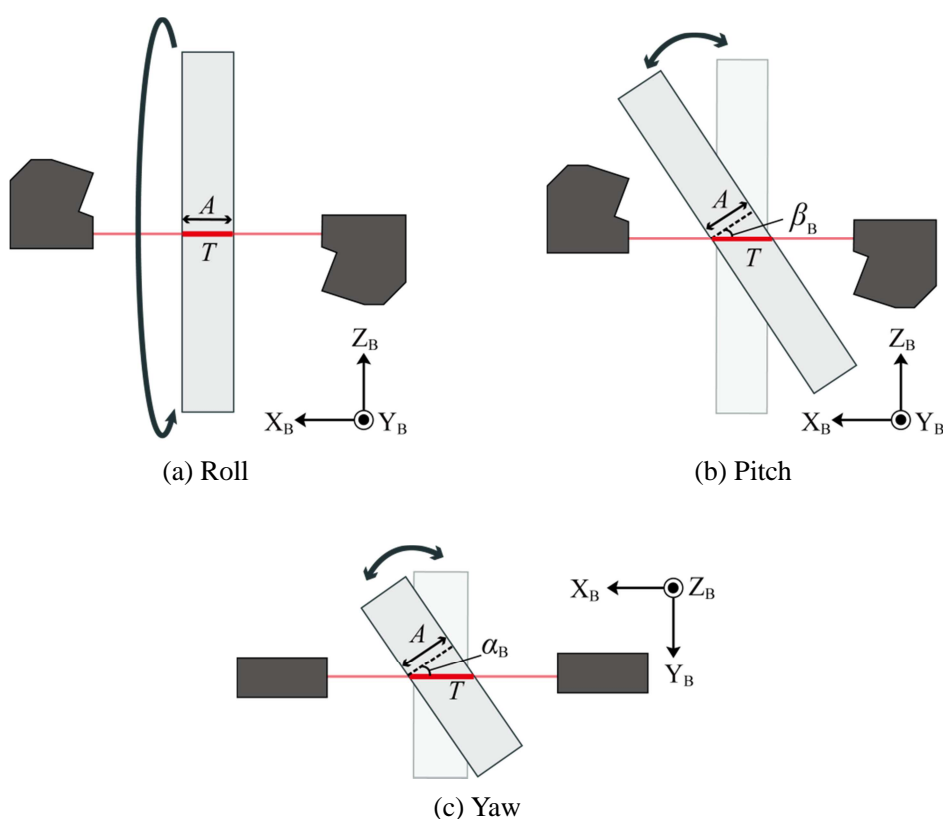


Fig. 6.19 Relationship between measured value and thickness equivalent value

6.5 測定実験

6.5.1 実験条件

基本姿勢にて干渉が生じるように作成した, 2 箇所を円錐台形状に張出加工した薄板に対して測定実験を行った. 1 つの円錐台の大きさは, 底面部直径 40mm, 上面部直径 20mm, 高さ 10mm である. 測定物を図 6.20 に, 実験条件を表 6.1 に示す. また, 基本姿勢での板

厚測定で干渉が生じた箇所を図 6.21 に示す。図から円錐台間部分において干渉が生じていることがわかる。

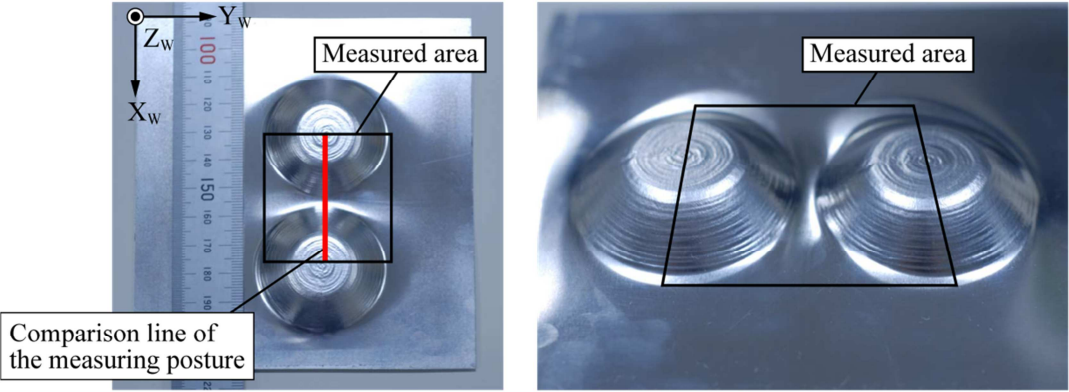


Fig. 6.20 Workpiece to be measured

Table 6.1 Experimental conditions

Material	Alminum (A1050)
Size	125 × 135 mm
Initial thickness	0.5 mm
Measurement range	46 × 46 mm
Measurement interval	2 mm
Number of measurement points	529
Shape	Twin frustums of a cone

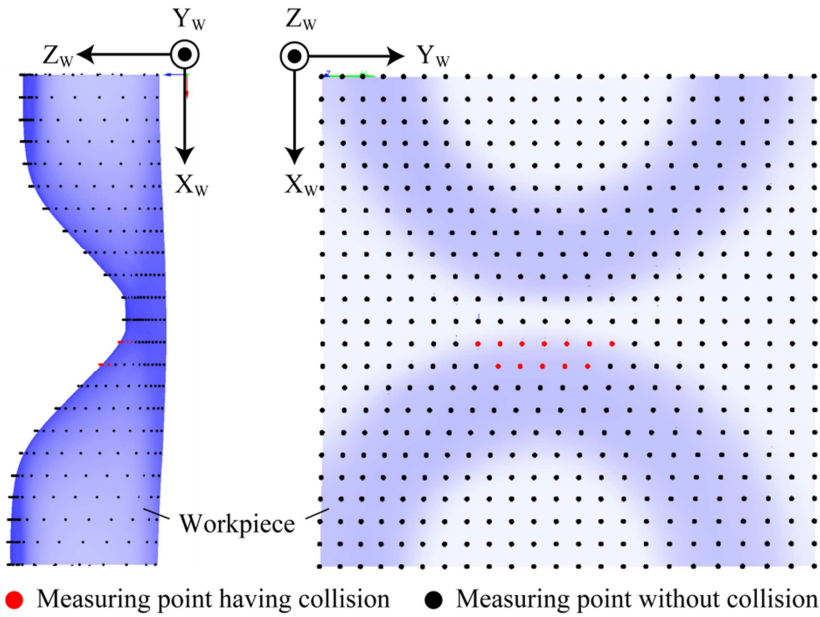


Fig. 6.21 Measuring points having collision

6.5.2 板厚測定結果

図 6.22 に測定した板厚分布図を示す。板厚分布図より全測定点において干渉が発生せず、測定値を取得できたことがわかる。また、一般的に張出加工された工作物の場合、加工箇所は素板状態よりも板厚が薄くなると考えられるが、測定結果からもその傾向が見て取れ、円錐台の上面エッジ付近で板厚が減少していることがわかる。

基本姿勢での干渉が発生し、姿勢を変化させた 9 列目の測定経路要素に対して、ポイントマイクロメータとの測定値の比較を行った。図 6.23 にポイントマイクロメータでの測定値を基準とした場合の本システムの測定誤差を示すが、最大誤差は $43\mu\text{m}$ となった。4 章における測定誤差の推定から、本実験を基本姿勢にて測定したとする場合、測定誤差は $44.2\mu\text{m}$ と推定されるが、板厚測定姿勢を変化させた場合でも同程度の誤差で測定することが可能であった。

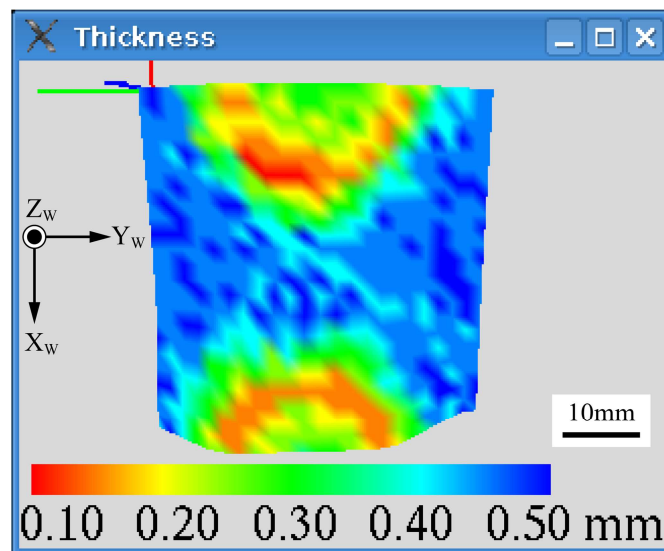


Fig. 6.22 Thickness distribution map

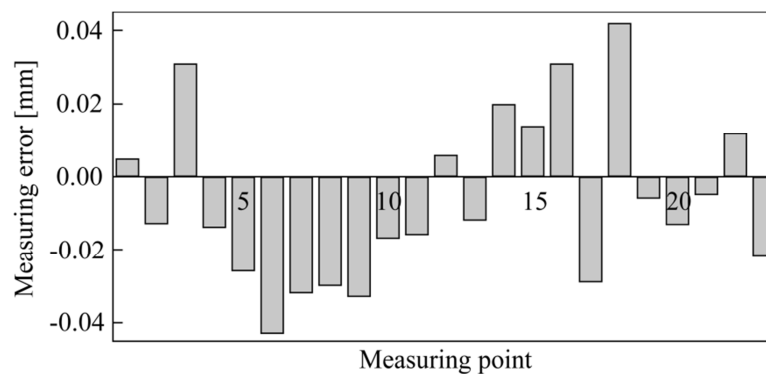


Fig. 6.23 Measurement errors in reference to measurements with a point micrometer in a measuring path element

6.5.3 測定経路

今回の測定物においては、8～14 列目において基本姿勢での干渉が検出されたため、これらの測定経路要素に対して姿勢を変化させた測定経路を生成し、その他の列においては基本姿勢での測定経路を生成した。提案手法を用いて生成した測定経路（以後、Path1）の姿勢連続性を検証するために、干渉点のみにおいて基本姿勢から C-Space で最低限量姿勢変化させて干渉回避した測定経路（以後、Path2）との任意の一例（12 列目）についての比較を図 6.24 に示す。

提案手法では、測定物上に設定した座標系に基づいて連続性を考慮した測定経路を生成したが、実際の測定においては生成した測定経路に基づいて動作するロボットの連続性が測定時間、測定の安定性に影響する要因であるため、ここでは、ロボットのコンフィギュレーション変化を用いて、測定経路の連続性を評価した。ここでのコンフィギュレーションとは、産業用ロボットの関節角度の組のことをいい、本システムでは 6 軸ロボットを使用しているため、6 つの角度が含まれる。評価項目は、コンフィギュレーションの角変位、角速度、角加速度とする。以下に各評価項目を説明する。

(1)角変位

ロボットの関節角度について、ある座標系からの回転角度を示す。

(2)角速度

角速度は、一般的には角変位の時間微分を示すが、ここでは隣り合う測定点間の各変位の差とする。よって、各測定経路要素の始点については 0 とする。

(3)角加速度

角速度と同様に、角速度の時間微分とするのが一般的であるが、ここでは隣り合う測定点間の角速度の差とし、各測定経路要素の始点については 0 とする。

図 6.25, 6.26, 6.27 に Path1, Path2 の角変位、角速度、角加速度を示す。図 6.25 から各軸共に Path1 は急激な角度変化は発生せず、動作範囲が Path2 と比較して大幅に小さいことが分かる。動作量が最大の 6 軸においては、動作範囲の P-P 値が Path1 では 26.6° 、Path2 では 77.8° となり、Path1 は Path2 と比較して約 66% 小さい動作範囲となった。また図 6.26 の角速度においても Path2 は不連続に大きく変化しており、6 軸にて最大角速度が $38.2^{\circ}/\text{point}$ となるのに対して、Path1 は最大 $10.6^{\circ}/\text{point}$ となり、角速度は約 73% 減少した。図 6.27 の各加速度については、6 軸にて最大は Path1 で $9.0^{\circ}/\text{point}^2$ 、Path2 で $43.4^{\circ}/\text{point}^2$ となり、約 79% Path1 は小さい結果となった。これらの結果より、提案する板厚測定手法は、干渉のみを考慮して生成した測定経路と比較して連続的な測定経路を生成することができたといえると考えらる。

図 6.28 に 12 列目測定時のロボット先端の軌跡を示す。ロボット先端の軌跡は図 6.29 に示すように 6 軸の移動を示し、測定時間に影響する。Path2 は Y_R 方向への移動が多く、Path1

は滑らかに変化し、移動量が小さいことがわかる．対象とする列での測定時間は Path1 が 15.0 秒，Path2 が 26.8 秒となり，Path1 は Path2 の約 56% の測定時間となった．

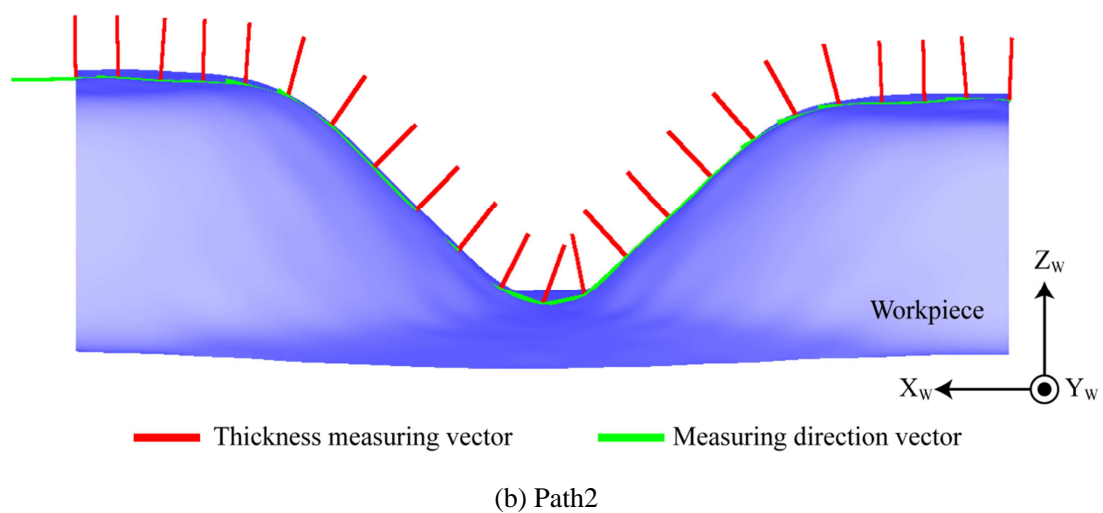
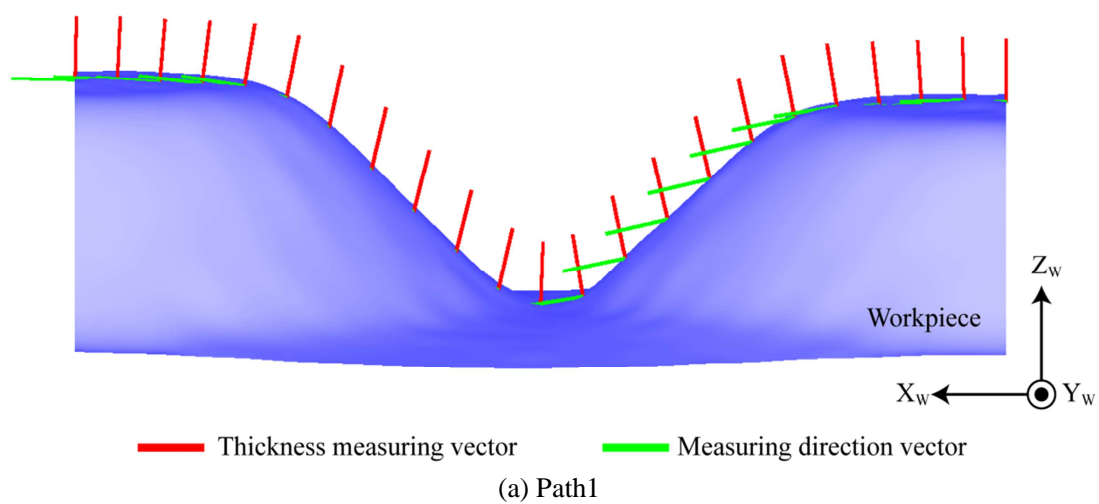
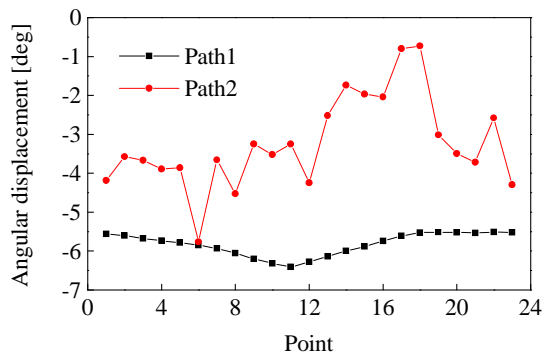
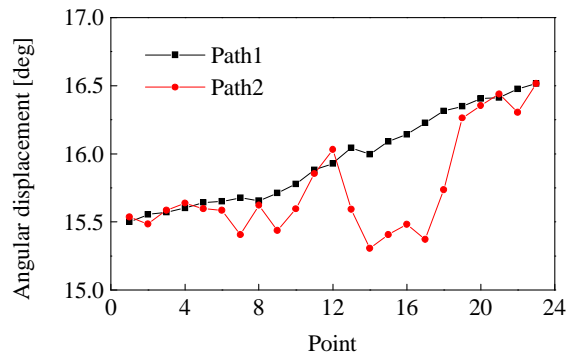


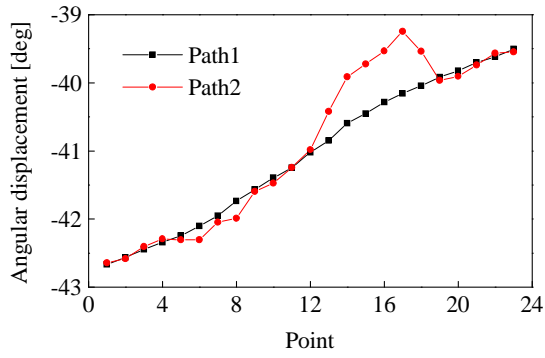
Fig. 6.24 Thickness measuring path



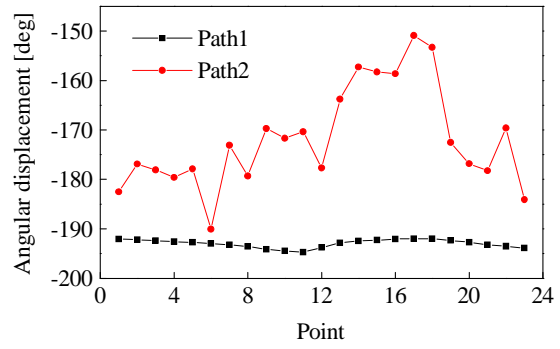
(a) Axis-1



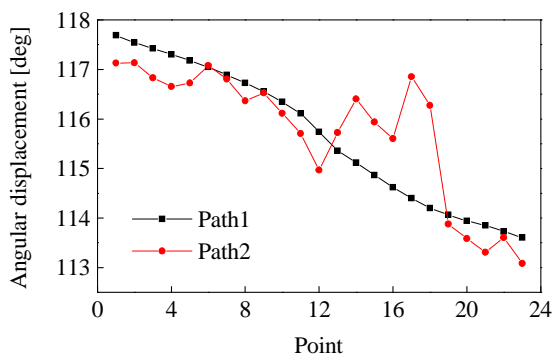
(b) Axis-2



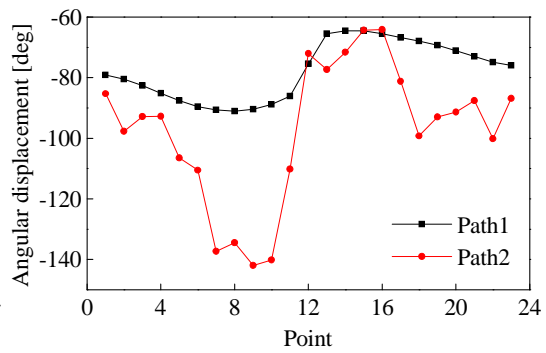
(c) Axis-3



(d) Axis-4

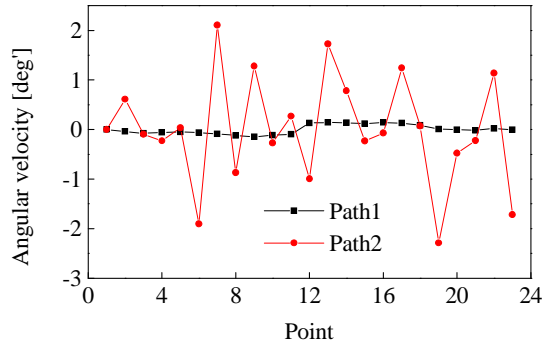


(e) Axis-5

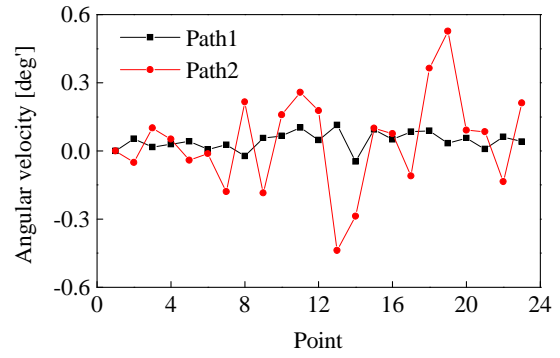


(f) Axis-6

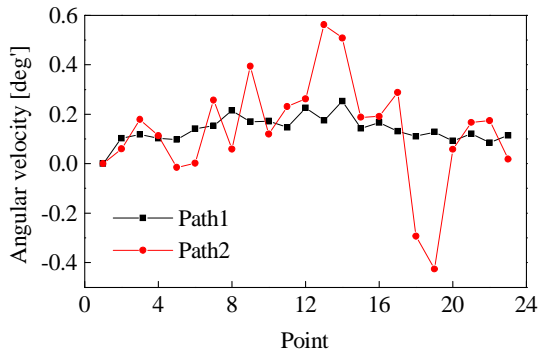
Fig. 6.25 Angular displacement



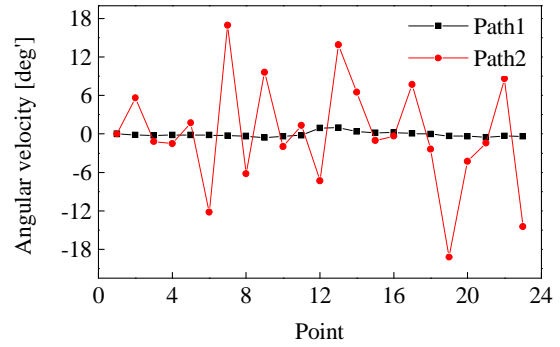
(a) Axis-1



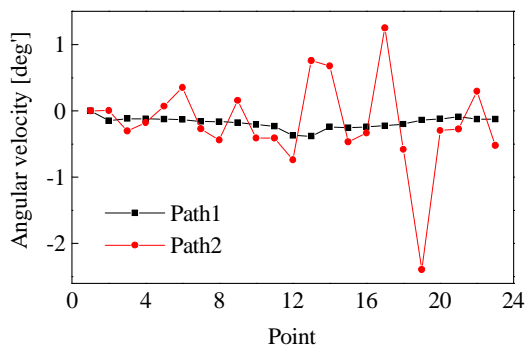
(b) Axis-2



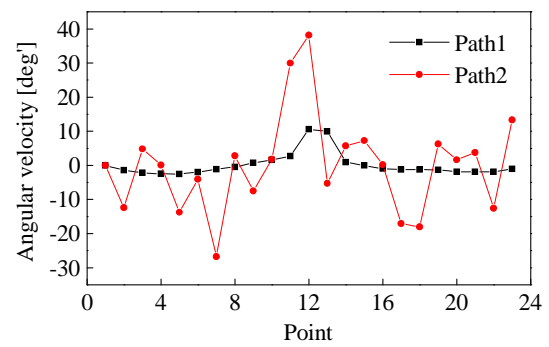
(c) Axis-3



(d) Axis-4

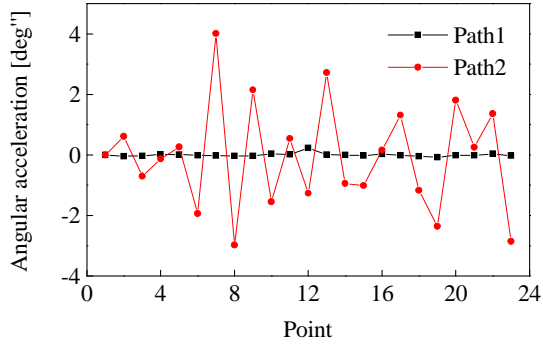


(e) Axis-5

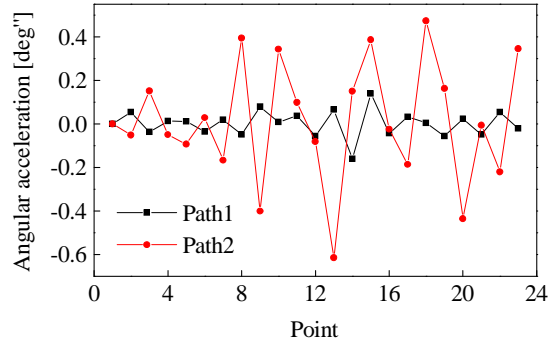


(f) Axis-6

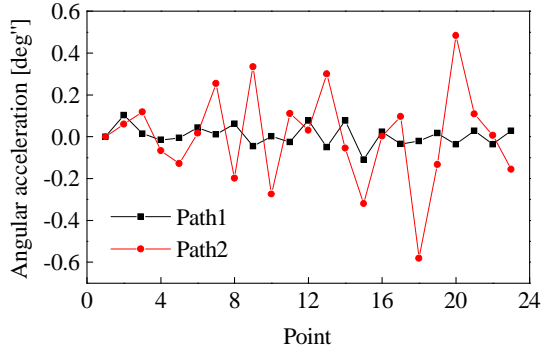
Fig. 6.26 Angular velocity



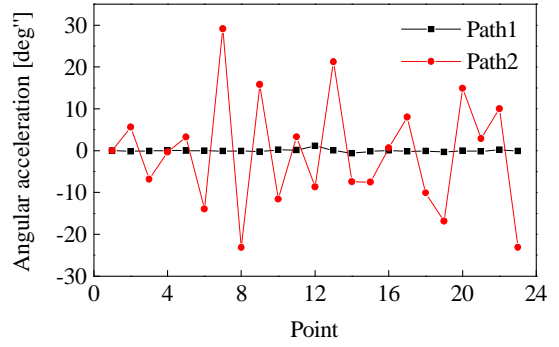
(a) Axis-1



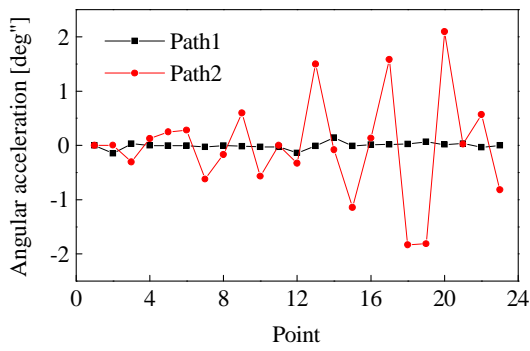
(b) Axis-2



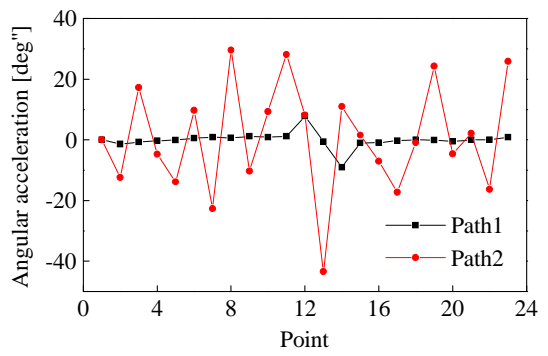
(c) Axis-3



(d) Axis-4

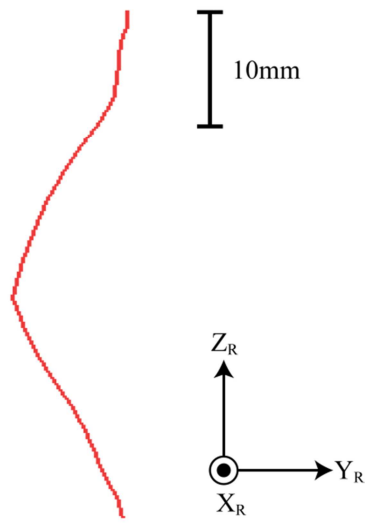


(e) Axis-5

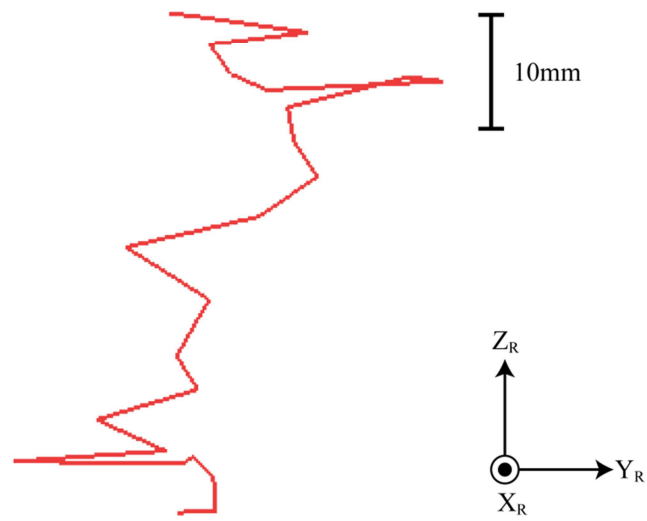


(f) Axis-6

Fig. 6.27 Angular acceleration



(a) Path 1



(b) Path 2

Fig. 6.28 Trajectory of end of robot arm

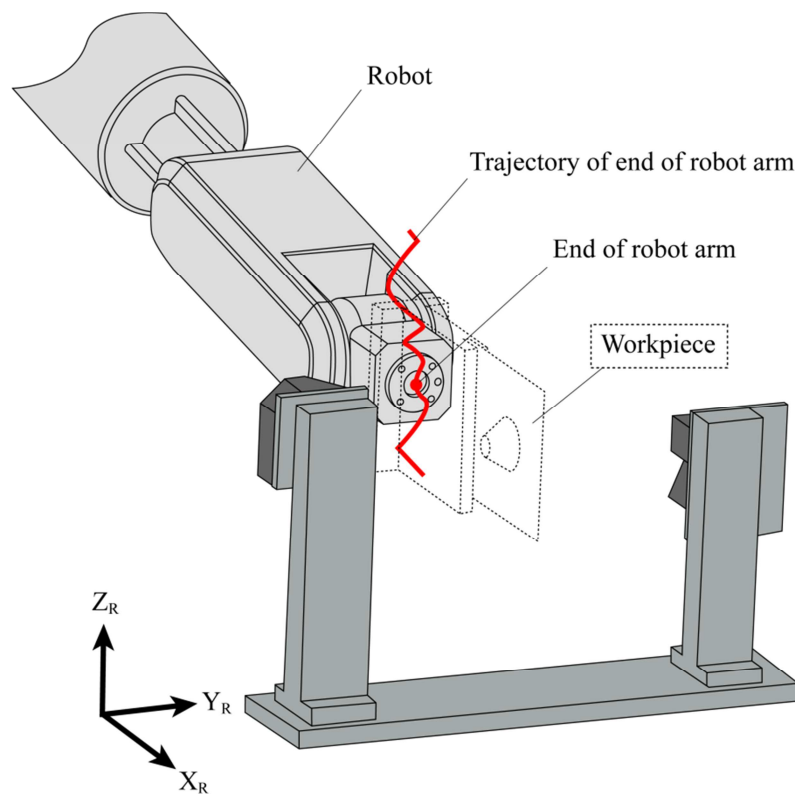


Fig. 6.29 End of robot arm

6.6 まとめ

本章では，測定姿勢の連続性を考慮した干渉回避経路の生成手法を提案し，測定実験を行った．また，ロボットのコンフィギュレーション評価より，連続性の評価を行い，以下の結果を得た．

- (1) C-Space 上に複数の誤差要因を表現することで，各誤差要因を統一して扱い，測定可能な姿勢群を算出した．
- (2) クォータニオンによる姿勢補間アルゴリズム **squad** を用いて，測定姿勢の連続性を考慮した板厚測定経路を生成した．
- (3) 円錐台形状に対する測定実験により，提案手法を用いることで基本姿勢では測定不可能となる領域の測定が可能となることを確認した．
- (4) 円錐台形状に対して生成した測定経路について，干渉点のみ最低限量姿勢変化させることで干渉回避した測定経路を比較対象とし，ロボットのコンフィギュレーション変化により姿勢の連続性を評価した結果，変化量が最大となる 6 軸において提案手法は比較対象に対して角変位が 66%，角速度が 73%，角加速度が 79%減少していることを

確認した。

- (5) 円錐台形状に対する測定実験より，干渉点のみ最低限量姿勢変化させた測定経路と比較して，ロボット先端の移動量が減少し，提案手法を用いることで測定時間が短縮されることを確認した。

参考文献

- [1] 森重功一，加瀬究，竹内芳美，2次元 Configuration 空間を用いた 5 軸制御加工における工具干渉回避法，精密工学会誌，62(1)，pp.80-84，1996.
- [2] (株)キーエンス，LK-G シリーズ ユーザーズマニュアル.
- [3] 三浦曜，望月一正，CAD・CG 技術者のための実践 NURBS，pp.156-162，工業調査会，2001.
- [4] 穂坂衛著，東正毅，斉藤剛，久志本琢也訳，CAD/CAM における曲線曲面のモデリング，pp.343-378，東京電機大学出版局，1996.
- [5] 太田順，倉林大輔，新井民夫，知能ロボット入門ー動作計画問題の解法ー，コロナ社，2001.
- [6] Mark DeLoura，川西裕幸，狩野智英，Geme Programming Gems，ボーンデジタル，2002.

第7章 表面テクスチャを持つ工作物のための経路生成

7.1 概要

本システムでは、一般的な金属面を持つ工作物の板厚を主な測定対象として開発に取り組んできたが、実際には「薄板」に分類される工作物の表面性状には様々な付加加工が施されている場合がある。例として、工作物表面に微小な凹凸を形成するシボ加工やエンボス加工があるが、これらは様々なテクスチャを工作物表面に形成することで、製品の付加価値や機械的性質を向上させるものである。また、近年注目されている CFRP は繊維材料が含まれることから、プレス加工における加工条件の検討段階で繊維の織り目によるしわなどの凹凸が生じやすい。ここでは、このような工作物表面の凹凸をまとめて「表面テクスチャ」と定義する。本システムでは、測定対象点の板厚方向を決定する法線ベクトルを実測定物の形状データから算出するため、測定物が表面テクスチャを持つ場合、微小な凹凸により適切な法線ベクトルの算出が困難となる。そこで本章では、概形を表す CAD データを用いて法線ベクトルを生成し、実測定物形状に投影することで、表面テクスチャに影響を受けない法線ベクトルの生成手法を提案し、表面テクスチャを持つ測定物に対する本システムの適用可能性を示す。ここでは、形状測定結果から法線ベクトルを算出する方法を「形状測定併用型測定経路生成手法」、CAD データを用いて法線ベクトルを算出する方法を「CAD データ併用型測定経路生成手法」と呼ぶこととする。

7.2 測定方法

CAD データ併用型測定経路生成手法では測定物の CAD データから算出した法線ベクトルを形状測定データに投影することで板厚測定を行うが、投影のためには形状測定データと CAD データを適切に関連付ける必要があり、関連付けを行うために各データのモデル化を行う。形状測定データは、6 章で示した干渉検出のためのモデル化と同様に、測定点群を通過する NURBS 曲面でモデル化し、「測定モデル」と定義する。また CAD データは、通常製品の表面、裏面のすべての面データを含んでいるが、ここでは形状測定された面のみを NURBS 曲面として出力し、「CAD モデル」と定義する。

以下、データの重ね合わせ、法線ベクトルの算出手順を示す。

- (1) 大抵的な位置合わせのために、各モデルの重心座標を算出して一致させる。重心座標は、各モデルにおいて UV 方向に等間隔に生成した点群座標値を用いて算出した。
- (2) 測定モデルの UV 空間上に等間隔な点を板厚測定対象点とする。CAD モデルを各軸に微小量ずつ並進、回転させ、板厚測定対象点から CAD モデルまでの最近傍点を算出する。図 7.1 のように板厚測定対象点と CAD モデル上の最近傍点間の距離を 2 つのモデ

ルの形状偏差とし、形状偏差の二乗和が指定した収束値以内に収まるまで、CAD モデルの移動を繰り返す。

- (3) 板厚測定対象点からの CAD モデル上の最近傍点において、法線ベクトルを算出し、対応する測定モデルの板厚測定対象点における法線ベクトルとして定義する (図 7.2)。

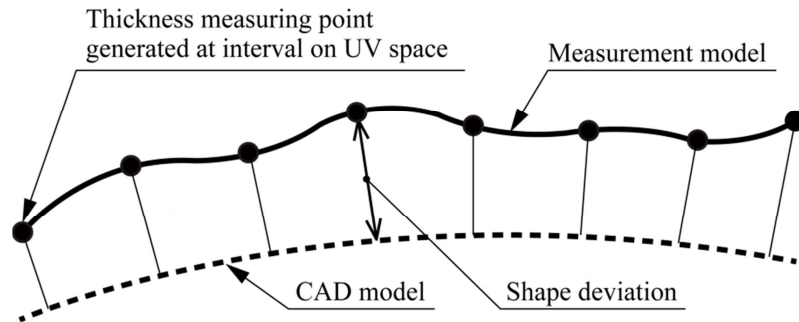


Fig. 7.1 Shape deviation between measurement model and CAD model

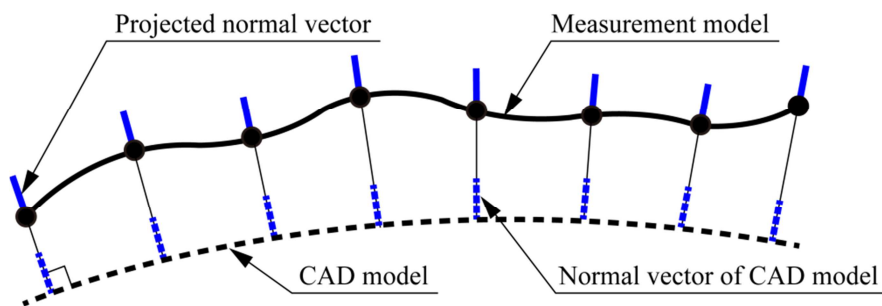


Fig. 7.2 Projection of designed normal vector to measurement model

7.3 測定実験

7.3.1 工作物全体

提案手法の有効性を確認するために、測定実験を行った。測定物は、CFRP のプレス加工品とし、表面には繊維の織り目によるしわ等の微小凹凸が存在する。図 7.3 に測定物概観、図 7.4 に測定表面の拡大図を示す。縦糸と横糸の格子サイズは約 2mm 程度であり、しわや樹脂のにじみ等、様々なテクスチャが生じている。実験条件を表 7.1 に示す。対象としたモデルは垂直に近い側面形状を持つため、形状測定には、5 章で述べた形状測定手法を用い、側面部分においても平面部と同様の密度を持つ形状データを取得した。形状測定データを図 7.5 に示し、取得した形状データから生成した測定モデルと測定対象物の CAD データから生成した CAD モデルを図 7.6 に示す。測定モデルは、形状データが微小な凹凸を反映し

ていることがわかる．図 7.7 に各モデルから算出した法線ベクトルを示す．実形状データから算出した法線ベクトルは，平面部分において明らかなばらつきが生じているのに対して，CAD モデルから算出した法線ベクトルにはそのようなばらつきは生じず，一定の方向である．また，図 7.8 に提案手法により算出した法線ベクトルに基づいて測定した板厚測定結果を示す．板厚分布は細かく変化し，テクスチャを反映していることが確認できた．

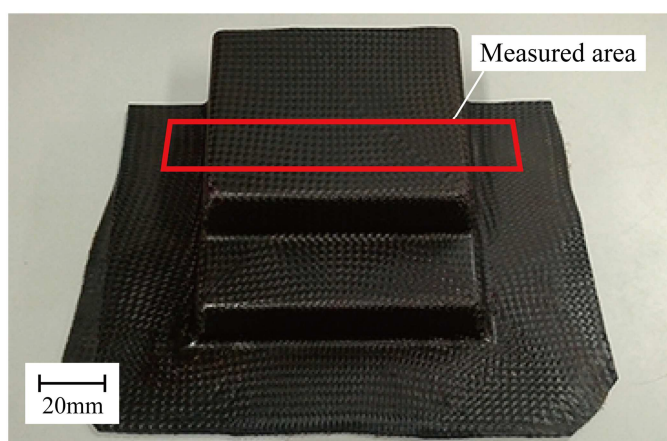
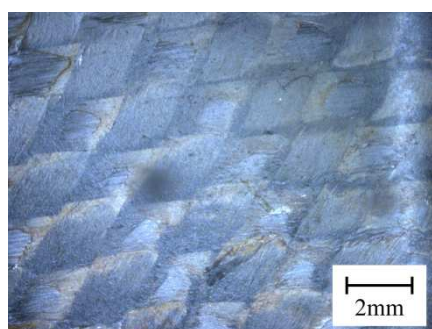
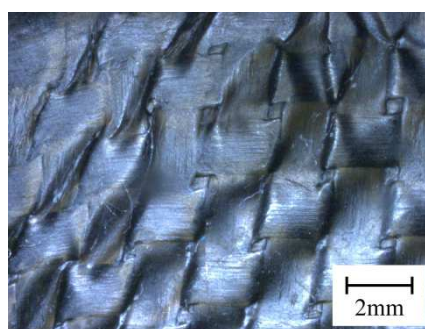


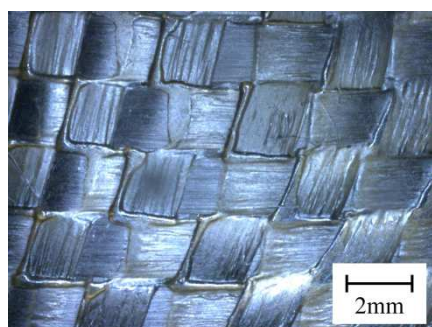
Fig. 7.3 Workpiece



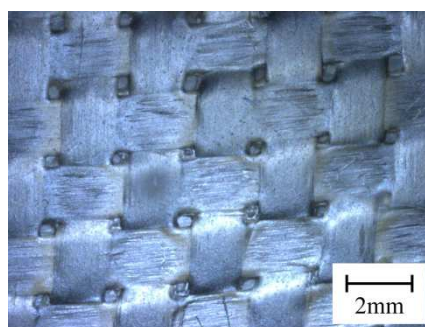
(a) Flat



(b) Crease



(c) Raised resin



(d) Hole

Fig. 7.4 Close up of measurement surface

Table 7.1 Experimental conditions

Workpiece size	140(L) \times 185(W) \times 40(H) mm
Thickness (Unprocessed)	1 mm
Measurement range	115 \times 10 mm
Measurement interval	1 mm
Thickness measuring point	2010 (201 \times 10)

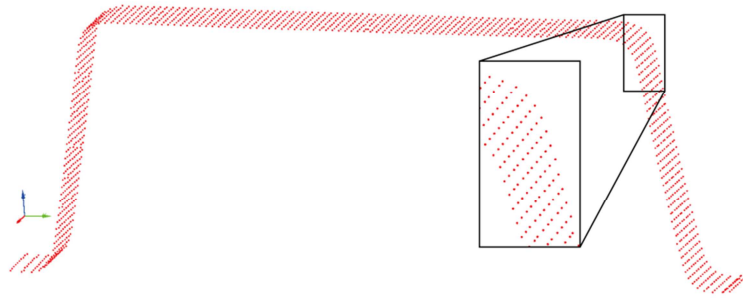


Fig. 7.5 Shape measured data

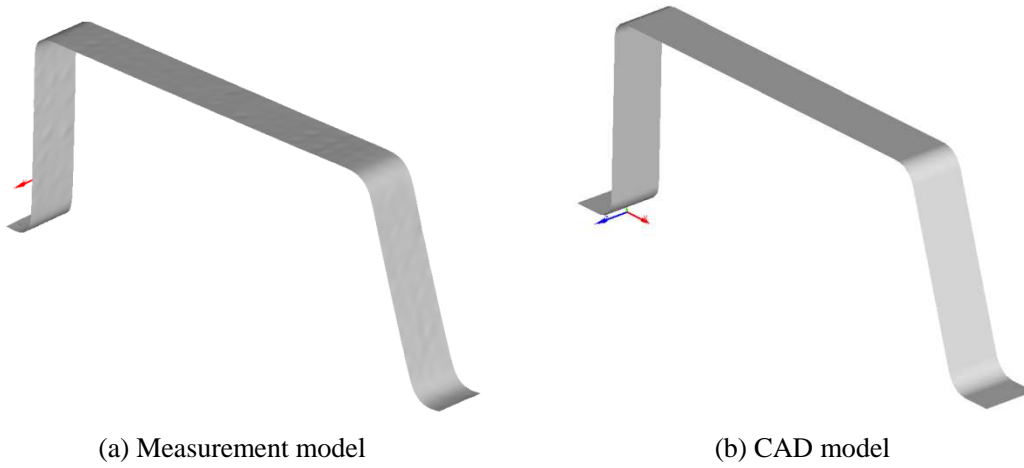


Fig 7.6 Models for fitting

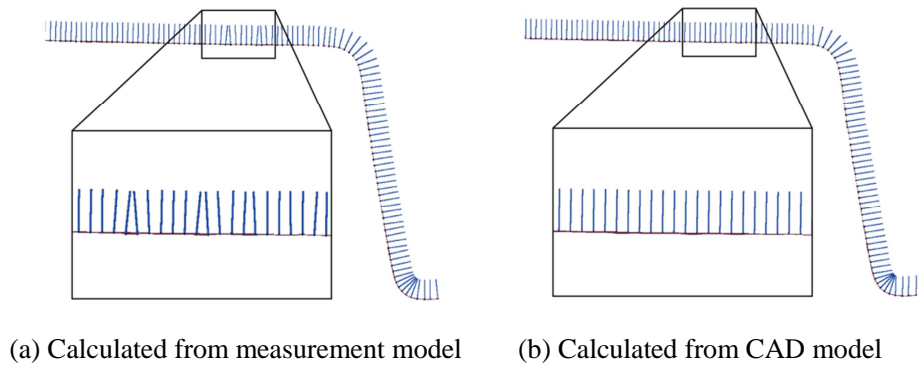


Fig. 7.7 Calculated normal vector

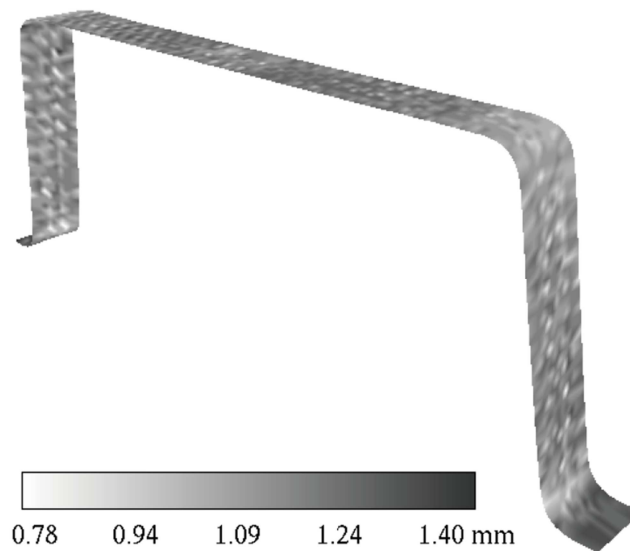


Fig. 7.8 Thickness distribution map

7.3.2 平面部

各モデルを用いて得られる板厚測定結果について詳細に比較・検証するために，測定間隔を微小に設定し，平面部の測定を行った．7.3.1と同様に測定物は **CFRP** のプレス加工品とし，測定範囲の測定物概観を図 7.9 に示す．また，図 7.9 に示す A-A 断面の断面形状測定結果を図 7.10 に示すが，表裏共に織り目による一山約 2mm の凸形状を有しており，織り目間は板厚が小さくなっていることが分かる．測定条件は測定範囲を 10×10mm，測定間隔を 0.2mm として測定を行った．

測定モデル，CAD モデルを用いた板厚測定結果を図 7.11 に示す．CAD モデルを用いた測定結果は測定モデルを用いた場合と比較して，板厚が小さい領域が大きいことが分かる．これは，図 7.12(a)に示すように測定モデルを用いた板厚測定では，表面形状に沿って板厚

測定方向が決定されるために、織り目間においても斜めにレーザが照射され、板厚が大きくなったものと考えられる。一方、CAD モデルを用いた板厚測定では、板厚測定方向はすべて図 7.12(b)に示すように平面方向に垂直に決定されるため織り目間の板厚減少が取得できたと考えられる。

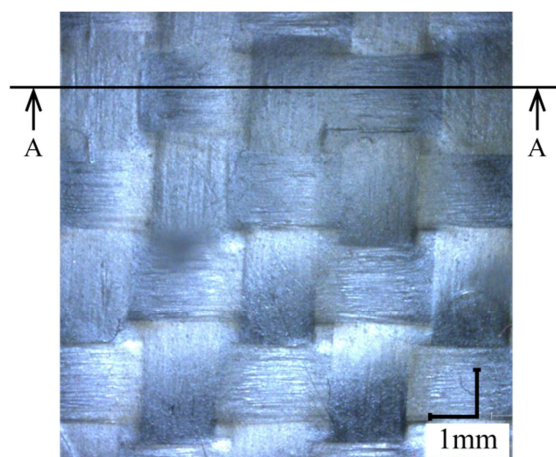


Fig. 7.9 Measured area

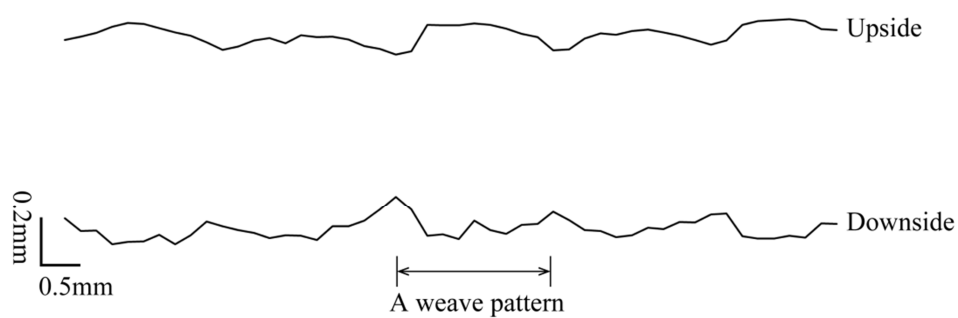


Fig. 7.10 Cross section of workpiece

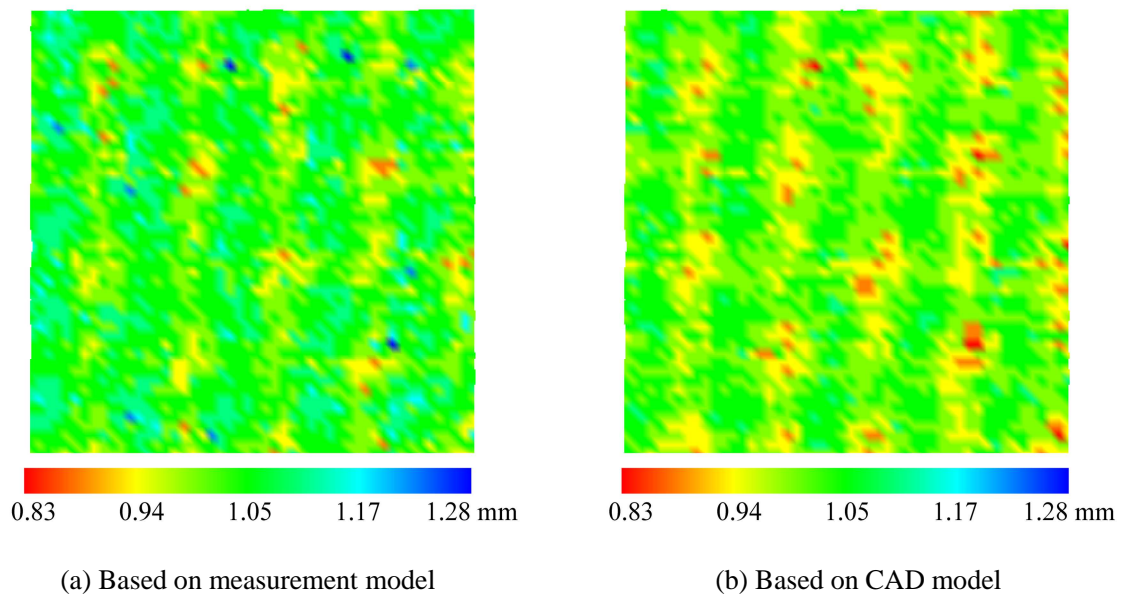


Fig. 7.11 Thickness distribution map

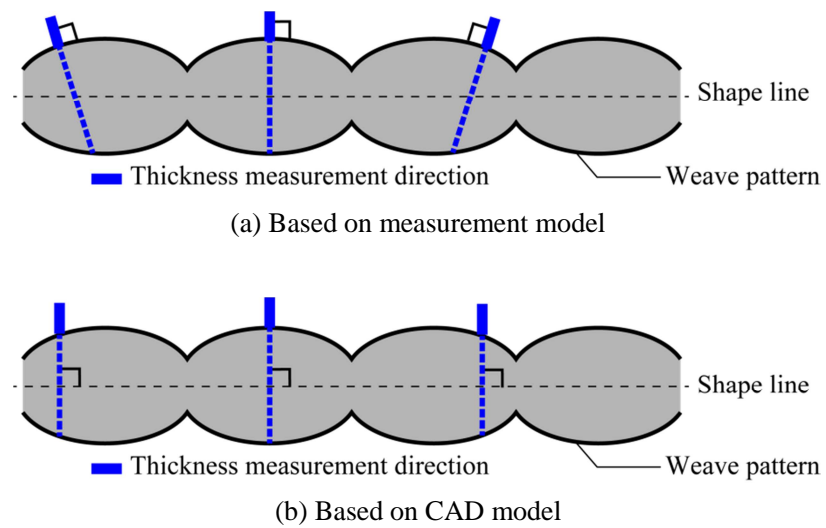


Fig. 7.12 Measurement posture

7.4 まとめ

本章では，提案する板厚測定システムを用いた表面テクスチャを持つ工作物の板厚測定のために，測定対象物の CAD データを用いて法線ベクトルを算出する CAD データ併用型測定経路生成手法を提案し，CFRP のプレス加工品に対して測定実験を行い，以下の結果を得た．

- (1) CAD データを基に算出した法線ベクトルを実測定対象形状上に投影することで、CAD データに基づいた板厚測定経路を生成した。
- (2) 測定物全体に対する測定実験において、提案手法を用いることで、大概的な板厚変化とテクスチャによる板厚変化を板厚分布図から確認できることが分かった。
- (3) 平面部に対する測定実験において、提案手法を用いた板厚測定では、測定モデルを用いた板厚測定と比較してテクスチャによる板厚の増減をより詳細に取得することができた。

第 8 章 結論

8.1 結論

本研究では、薄板加工品の自動板厚測定を目的として、産業用ロボットとレーザ変位計から構成される板厚測定システムの開発を行い、その基本的性能を評価した。また、複雑形状に対応するための最適な測定方法について検討を行った。

本研究で得られた結論を各章ごとにまとめると以下の通りである。

第 1 章では、本研究の背景及び目的を明らかにした。

第 2 章では、自由形状を持つ薄板加工品のための自動板厚測定を目的として、測定対象物の位置決め装置として産業用ロボットを使用し、測定器としてレーザ変位計を使用した測定システムを提案・試作し、開発したシステムにおける板厚測定原理を明らかにした。また、多点群に対して測定された板厚データの視覚的評価を可能にするために開発した描画システムについて述べた。

第 3 章では、第 2 章で述べた測定原理を考慮した測定経路生成手法を提案した。提案手法では、実形状データに基づいた板厚方向の決定を行うために、測定対象物の形状測定を実施する。よって、形状測定経路生成手法及び、取得した形状データに基づいた板厚測定経路生成手法を考案した。

第 4 章では、システムの構成要素に対して測定誤差要因を明らかにし、測定誤差要因の実験的な検証を行った結果から本システムにおける測定誤差を推定した。また、平板、円筒形状という基本的な形状に対する測定実験を行い、測定誤差を検証した結果、測定誤差の推定が妥当であることが確認された。

第 5 章では、第 4 章より、測定面に対してレーザ入射角度は 50° 以内で測定を行う必要があることが明らかになり、また高傾斜面に対しても高密度な点群を取得するために、 50° 以上の傾斜面を持つ測定対象物に対して、測定姿勢を変化させた形状測定方法を提案した。そして、提案手法の有効性評価のための測定実験を行い、提案手法を用いることで測定密度とレーザの入射角度が改善されることを確認した。

第 6 章では、測定物とレーザ光との干渉が生じる形状の板厚測定を可能にするために、干渉を考慮した板厚測定経路生成手法を提案し、測定時間を短縮するために測定姿勢の連続性についても考慮した測定経路の検討を行った。そして、提案手法の有効性評価のための測定実験を行い、干渉発生箇所の測定データ取得が可能となったこと、位置決め装置と

して使用したロボットのコンフィギュレーション変化の評価から、測定経路が高い連続性を持ち、測定時間が短縮できたことを確認した。

第 7 章では、開発した測定システムを用いた測定対象物の拡張を検討するために、表面テクスチャを持つ測定物に対する本システムの適用の可能性とその方法を示した。表面テクスチャの影響を受けない板厚測定を実現するために CAD データを用いて板厚測定経路を生成し、織り目による凹凸を持つ CFRP 製品に対して測定実験を行った結果、形状測定データから板厚測定経路を生成する手法と比較して、表面テクスチャの凹凸による板厚増減を詳細に取得できることを確認した。

第 1 章から第 7 章における研究成果より、複雑形状に対して開発した板厚測定システムを用いて高精度な板厚測定を実現するためには、以下の条件を満たして測定する必要があると言える。

- (1) 形状測定において、測定対象物の傾斜角度が 50° 以上となる場合は、適切なレーザ入射角度となる形状測定姿勢での測定を行う。
- (2) 測定物とレーザ光との干渉が生じる形状では、干渉箇所を検出し、干渉が生じない板厚測定姿勢を生成する。
- (3) 干渉回避のために板厚測定姿勢を変化させる場合は、測定姿勢の連続性を考慮した測定経路を生成する。
- (4) 測定表面にテクスチャ形状を持つ工作物に対しては、工作物の CAD データを用いることでテクスチャ形状に依存しない測定経路を生成する。

8.2 今後の展望

本研究では、自由曲面を持つ薄板加工品のための板厚測定システムを開発し、複雑形状に対する測定手法の提案を行ったが、本研究の最終目標は、設計・生産工程における薄板加工品の板厚評価の実現であり、最終目標に対して以下に示す課題を残している。

1. 多重反射の考慮

本システムでも測定器として用いたレーザ変位計のような非接触センサを用いた測定では、凹凸の多い面などにおいて測定箇所以外の別の面で反射した反射光が発生し、測定誤差が生じることがある。システムの汎用性を向上させるためには、このような形状に対する測定方法の確立が必要であると考えられる。

2. 非格子状の測定点群に対する連続性を考慮した板厚測定経路の生成

本研究では、複雑形状に対する板厚測定を実現するために、形状測定、板厚測定方法を提案したが、6章で述べた板厚測定経路は格子状の測定点群に対してのみ対応しており、5章で提案した高密度形状点群に対しての検討が行われていない。これらの形状、板厚測定を組み合わせた測定を行うことで、より高密度な点群を短時間で測定することができると考えられる。

謝辞

本論文を作成するにあたり，指導教員として多くのご指導ご助言を賜りました，金沢大学大学院 浅川直紀教授に心より厚く御礼申し上げます。また本論文の作成のみに留まらず，研究活動に対する姿勢とその楽しさを教えて頂けたことは私の今後の糧となるものでした。ありがとうございました。

ご多用の中，副査をお引き受け頂きました，金沢大学 米山猛教授，関啓明教授，立矢宏教授，石川和宏教授に心から感謝の意を表します。

装置の設計および加工，その他多方面におけるご指導を賜り，公私にわたって常に相談に乗って頂きました金沢大学理工研究域 浅野久志技術職員に心から感謝申し上げます。

また当時，金沢大学マンマシン研究室の助教で，現在，福井大学に在職されている岡田将人講師には，終始熱心なご指導を賜り，特に知識が不足していた塑性加工学については多くのことを学ばせて頂きました。また公私にわたって暖かいご助言を頂きました。深く感謝の意を申し上げます。

本研究遂行にあたり，測定対象となる工作物を提供して頂きました金沢大学人間・機械創造研究室 立野大地氏に心より感謝申し上げます。

また，在学時には，公私ともども多大なるご指導を賜りました現三菱自動車工業(株) 吉田修平氏，ならびに私の要望に応じて測定対象物を作成，提供頂きました現石川県庁 城野麻未氏，現京セラ(株) 長谷川謙氏，現鳥取大学 山本芳苗助教には心より感謝申し上げます。

さらに本研究を進めるに当たり，様々なご協力，アドバイスを頂いたマンマシン研究室の諸先輩方，諸同輩，諸後輩の存在は研究を進めていく上で大きな励みとなりました。心から感謝申し上げます。

日本学術振興会には，博士課程2年より特別研究員に採用頂き，2年間の公私にわたる資金的な援助を頂きました。厚く御礼申し上げます。

最後に，今日に至るまでの学生生活を暖かく見守り続け，支援してくれた両親に対して深く感謝の意を表して謝辞と致します。